Kb
582

А. ЛИНКЕР

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

RS 3928

Кв 398

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА

30.256

А. ЛИНКЕР

621.317

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Перевод с 3-го немецкого издания
с дополнениями инж. А. С. КАСАТКИНА

С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТАТЬЕЙ:

ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ КРИВЫХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

инж. З. В. ЧЕРДАНЦЕВОЙ

Под общей ред. проф. И. А. ЧЕРДАНЦЕВА

Політехнічного Інституту
Головна
Бібліотека

МАКИЗ

МОСКОВСКОЕ АКАДЕМИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА „МАКИЗ“ 1927

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА.

Появляющаяся первая часть книги Linker'a Elektrotechnische Messkunde разделена нами на три отдела: первые два являются переводом двух отделов оригинала, при чем переводчиком преподавателем инж.-эл. А. С. Касаткиным сделаны многочисленные добавления; все добавления отмечены в тексте звездочками. Перечислим здесь главнейшие: 1) во введении, о суб'ективном и об'ективном методах отсчета и о демпфировании стр. VIII, 2) Амперметры и вольтметры стр. 1, 3) Гальванометры стр. 15, 4) Капиллярный электрометр стр. 78, 5) Индукционные, тепловые и электростатические уаттметры стр. 90, 6) Электрические счетчики стр. 100, 7) Фазометры стр. 115, 8) Частотомеры стр. 116, 9) Теория баллистического гальванометра стр. 119.

В виду того, что методы и приборы для снятия и анализа кривых переменного тока представлены у Линкера крайне недостаточно, находясь во второй части книги, посвященной испытаниям машин, было сочтено необходимым добавить отдел 3-й „Получение и анализ кривых переменного тока“.

Этот отдел составлен преподавателем инж.-технологом З. В. Черданцевой.

Одним из ценных свойств книги Линкера являются обильные библиографические указания. Во всех добавлениях это направление книги по возможности также выдержано.

Направление вращения векторов или линии времени и обозначения некоторых величин отличны от обозначений Линкера и согласованы с таковыми, принятыми Международной Электротехнической Комиссией.

Профессор *И. Черданцев.*

Типография и Словолитня „КРАСНАЯ ПРЕСНЯ“ (Мосполиграф) М. Грузинская ул., Столярный, пер. № 5-7.
Главлит 59704. Тираж 4000.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение VII

Отдел I. Электрические измерения.

1. Амперметры и вольтметры 1
2. Гальванометры 15
3. Измерение сопротивления мостиком Уитстона 20
4. Измерение сопротивления по способу замещения 23
5. Определение сопротивления измерением тока и напряжения 24
6. Измерение сопротивления дифференциальным гальванометром 27
7. Измерение малых сопротивлений (Matthiessen и Hockin) 33
8. Измерение малых сопротивлений двойным мостиком Томсона 34
9. Сопротивление гальванометра в мостике (Томсон) 37
10. Сопротивление элементов (Манс) 38
11. Сопротивление элементов (Нернст) 39
12. Удельное сопротивление металлов 40
13. Удельное сопротивление жидкостей (измерение постоянным током) . . . 40
14. Удельное сопротивление жидкостей (измерение переменным током) . . . 41
15. Исследование громоотводов 43
16. Сопротивление стыков рельс 45
17. Измерение сопротивления изоляции 45
18. Измерение изоляции готовых установок посредством вольтметра 48
19. Испытание изоляции готовых установок с помощью электростатического вольтметра 49
20. Измерение изоляции линии во время работы 52
21. Измерение изоляции телефонных кабелей 58
22. Определение места повреждения изоляции 60
23. Испытание изоляции установок переменного тока 62
24. Определение температурного коэффициента 63
25. Сравнение эл. дв. сил посредством компенсации 64
26. Измерения компенсационным аппаратом 64
27. Измерения посредством электрометра 70
28. Измерение тока вольтаметром 80
29. Измерение напряжения и силы тока при высоком напряжении переменного тока 81
30. Измерение переменных токов малой силы с высоким числом периодов . . . 85
31. Измерение электрической мощности 87
32. Электрические счетчики 100
33. Фазометры 115
34. Частотомеры 116
35. Баллистический гальванометр 119
36. Сравнение емкостей (баллистически) 130
37. Сравнение емкостей посредством компенсации (В. Томсон) 132
38. Сравнение емкостей (де-Соти) 133
39. Абсолютное измерение емкости (Максвелл—Дж. Дж. Томсон) 135
40. Абсолютное измерение емкости посредством дифференциального гальванометра 136
41. Измерение самоиндукции 137
42. Измерение самоиндукции в мостике (Максвелл) 140
43. Сравнение самоиндукций между собой (Максвелл) 142
44. Сравнение самоиндукций посредством дифференциального телефона . . 145
45. Сравнение самоиндукции с емкостью (Максвелл) 146
46. Сравнение самоиндукции с емкостью (Андерсон) 147

47. Измерение взаимоиндукции 149
48. Измерение взаимоиндукции (Троубридж) 150
49. Сравнение взаимоиндукции с емкостью (Pirani & Roiti) 150
50. Сравнение взаимоиндукции с самоиндукцией (Максвелл) 152
51. Сравнение взаимоиндукций между собой (Максвелл) 153
52. Сравнение взаимоиндукций между собой (Кэмпбелл) 155
53. Сравнение индукции и емкости друг с другом (Carey Forster) 155
54. Измерение постоянной времени больших сопротивлений. 156
55. Определение диэлектрической постоянной. 158
56. Испытание пробивной крепости изолирующих материалов 159
57. Градуирование и проверка амперметров и вольтметров 160
58. Испытание уаттметров и электрических счетчиков 163
59. Испытание аккумуляторов. 169
60. Исследование термоэлектрической батареи 172
61. Исследование электрического кипятильника. 173

Отдел II. Магнитные измерения.

1. Магнитометрический метод 175
2. Баллистический метод 180
3. Метод магнитного перешейка (Юинг) 186
4. Испытание железа по методу ярма (Гопкинсон). 187
5. Метод отрывания. 190
6. Магнитные весы 191
7. Аппарат Кэпселя 194
8. Измерение магнитного поля висмутовой спиралью 195
9. Нулевой метод для испытания железа 196
10. Определение коэффициента рассеяния 198
11. Прибор для практического измерения гистерезиса. 201
12. Практическое испытание железа прибором Эпштейна 202
13. Снятие переменным током характеристических кривых железа 211
14. Снятие кривых распределения поля электрических машин (полюсных диаграмм) 213

Отдел III. Получение и анализ кривых переменного тока.

1. Диск Жубера. 220
2. Ондограф Оспиталье 223
3. Осциллографы по Блонделю 224
4. Осциллографы других систем с подвижной системой, обладающей инерцией 231
5. Осциллографы не обладающие инерцией 232
6. Экспериментальный анализ кривых. 235
7. Арифметический анализ. 237
8. Анализаторы 240
Таблица некоторых постоянных 244
Предметный указатель. 247
Указатель имен 252
Сокращения 255

ВВЕДЕНИЕ.

Нужно различать абсолютные и относительные измерения. Измерение называется абсолютным, когда оно производится в абсолютных единицах. Если же, некоторую величину сравнивают с некоторой другой, условно принятой за нормальную, то измерение относительно. При этом важно знать степень точности измерения, то-есть возможную величину ошибки измерения, для чего нужно выяснить в каждом отдельном случае возможные причины ошибок.

Возьмем среднее арифметическое из большого числа отсчетов, разности между ним и отдельными значениями дают абсолютную ошибку f. В методе наименьших квадратов средней ошибкой отдельных измерений называется

$$f_{\text{сред.}} = \pm \sqrt{\frac{\Sigma f^2}{(n-1)\ n}}$$

где n число измерений. Вероятной ошибкой отдельного измерения называется величина $f_{\text{вер.}} = 0{,}674 \cdot f_{\text{средн.}}$

Нас интересует, однако, главным образом относительная ошибка, т.-е. выраженное в % отношение абсолютной величины возможной ошибки к значению измеряемой величины.

Ошибки при измерении могут иметь причиной:

1) неточность наблюдения (индивидуальная неточность отсчета);
2) внешнее влияние;
3) недостатки самого прибора (неточность шкалы);
4) несовершенство самого метода измерения.

Чтобы установить величину ошибки наблюдения, нужно из многих отсчетов, произведенных в одних и тех же условиях, взять среднее значение, затем определить максимальное отклонение отдельных отсчетов в положительном и отрицательном направлении от найденного среднего. Среднее значение этих отклонений и будет величиной ошибки. Чтобы, по возможности, избегать влияния ошибок наблюдения, надо производить возможно большее число отсчетов и пользоваться определенным из них средним значением.

Внешние влияния также могут оказаться причиной ошибок. Эти ошибки, однако, можно учесть лишь в том случае, когда они лежат вне границ ошибок наблюдения или вызывают такое изменение наблюденных величин, которое превосходит допустимую ошибку. Причиной этих ошибок может быть взаимное положение различных приборов, близость машин, масс железа, электрических и магнитных полей, влияние температуры и пр. Они могут быть уменьшены до незначительной величины целесообразным размещением приборов и проводов, употреблением сопротивлений и приборов, не зависящих от влияния температуры, и удалением всей измерительной установки от электрических и магнитных полей и машин. Однако, если нужно измерить

сопротивления, рабочая величина которых зависит от температуры, например сопротивление якоря, обмоток магнитов генераторов и катушек трансформаторов, то их величину следует определять при температуре, соответствующей рабочей нагрузке.

Сами измерительные приборы могут вызвать так называемые ошибки инструмента или градуировки, обусловленные расхождением показания прибора и истинного значения измеряемой величины. В некоторых случаях влияние этих ошибок можно уменьшить с помощью соответствующих вспомогательных средств (переключение направления тока, перестановка прибора) или же их нужно определить экспериментально.

При практическом осуществлении теоретической схемы мы сталкиваемся с влиянием сопротивлений контактов, соединительных проводов и измерительных приборов. Этим влиянием часто нельзя пренебречь, а подчас оно столь велико и так искажает метод, что делает его практически непригодным.. Ошибки, вызываемые этой причиной, называют ошибками метода. Если их нельзя определить вспомогательным измерением, то нужно применить вместо данного другой метод, более свободный от влияния этих ошибок.

При записи показаний приборов нужно поставить себе за правило отсчитывать на глаз не больше одной цифры, т.-е. предпоследняя цифра записанного показания прибора должна быть точной.

*В отношении подвижных частей измерительных приборов и методов наблюдения их движений можно сделать следующие общие замечания.

Подвижная часть электроизмерительного прибора, вследствие действия электрического тока, получает вращательное движение; реже поступательное; при этом направляющие силы создают противодействующий момент. Подвижная система, вследствие действия силы, отклоняющей ее из положения покоя и противодействия направляющей силы, после некоторых колебаний остановится, благодаря трению и демпфированию (успокоению), в новом положении равновесия. Время одного полного колебания системы будет

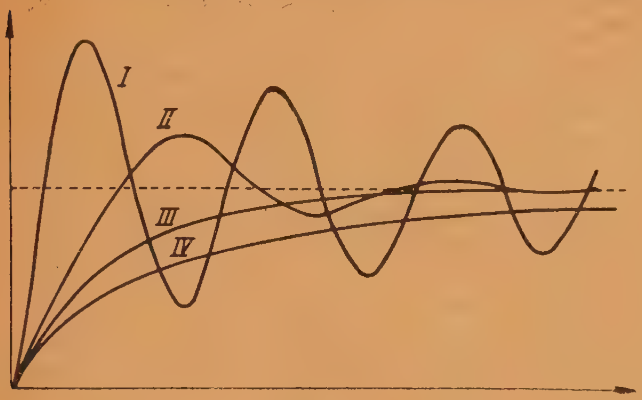
$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{K}{B}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\Lambda^2}{\pi^2}};$$

здесь K — обозначает момент инерции B — направляющую силу, Λ — логарифмический декремент (см. § 32). Рассмотрим значение этих величин.

Чем больше демпфирование (успокоение), тем больше Λ и тем скорее уменьшаются амплитуды следующих одно за другим колебаний, как говорят, тем скорее колебания „затухают“. На фиг. 1 показано влияние различных степеней демпфирования, по оси ординат отложены мгновенные величины отклонений, по оси абсцисс — время. Кривая I соответствует слабому, II — сильному демпфированию, в случае III — подвижная система примет новое положение равновесия без колебаний (апериодическое отклонение); при еще более сильном демпфировании, соответствующем IV кривой, подвижная система будет перемещаться в новое положение равновесия очень медленно, при чем в этом случае силы трения могут оказаться больше результирующей отклоняющей силы, и система практически остановится, не дойдя до нового положения равновесия. Удобнее всего работать при демпфировании среднем между II-м и III-м фиг. 1. Способы демпфирования гальванометров будут рассмотрены в параграфе, посвященном гальванометрам, в технических же приборах для демпфирования пользуются токами

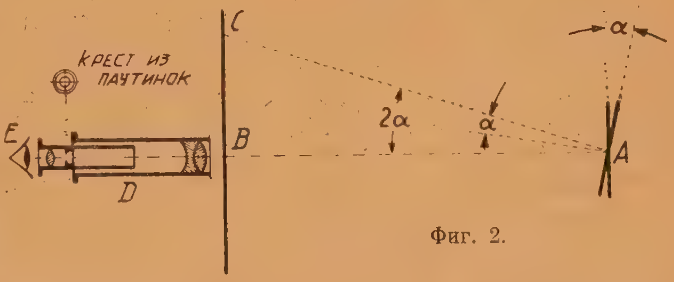
Фуко, индуктируемыми магнитным полем в металле, при движении металла в поле; эти токи превращают кинетическую энергию подвижной системы в Джоулево тепло. Менее совершенны воздушные демпферы, действие которых основано на сопротивлении воздуха движению системы; обычно они состоят из поршенька, движущегося с узким зазором в закрытом с одной стороны цилиндре (см. фиг. 15 и 16).

В качестве направляющей (противодействующей) силы для чувствительных гальванометров пользуются кручением нити на которой подвешивается подвижная система, или внешним магнитным полем; в технических приборах применяют плоские пружины и противовесы. Крутящий момент пружин и нитей, с большим приближением, можно принять обратно пропорциональным длине и прямо пропорциональным углу кручения, он уменьшается пропорционально квадрату сечения, т.-е. четвертой степени радиуса нити. Плоские нити для работы удобнее круглых.



Фиг. 1.

Для наблюдения отклонения подвижных систем особенно чувствительных приборов, служащих для измерения очень слабых сил тока (от 1.10^{-6} А) пользуются предложенным Поггендорфом и Гауссом методом зеркального отсчета, для чего к подвижной системе прикрепляют очень легкое зеркальце (посеребреный тонкий стеклянный кружок). Существуют два способа зеркального отсчета: суб'ективный и об'ективный.



Фиг. 2.

Суб'ективный отсчет. Схема расположения приборов показана на фиг. 2:

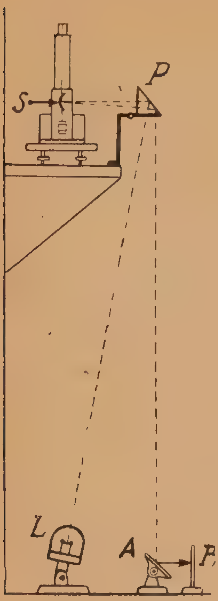
A — зеркальце подвижной системы прибора,
B — C — освещенная шкала с делениями,
D — подзорная труба,
E — глаз наблюдателя.

При первоначальном положении зеркальца в трубу видна точка B, после отклонения точка C; угол отклонения α определится из формулы:

$$\frac{CB}{AB} = tg\,2\alpha$$

Благодаря увеличению, даваемому зрительной трубой, можно с помощью креста из паутинок, помещенного внутри трубы, очень

точно определить величину угла отклонения (или отсутствие отклонения). Недостаток метода тот, что показания прибора может наблюдать только одно лицо, при чем оно лишено возможности одновременно следить за другими приборами.



Фиг. 3.

Об'ективный отсчет. На фиг. 3 L — лампа, P — призма, отражающая луч от лампы в зеркальце S гальванометра и луч из зеркальца на зеркало A и шкалу B, нанесенную на матовом стекле или целлулоиде. Изображение светлой щели, отраженное зеркальцем гальванометра, наблюдается на шкале B, угол отклонения определяется так же, как и при суб'ективном отсчете. Об'ективный отсчет более удобен, но менее точен чем суб'ективный, благодаря отсутствию зрительной трубы.

При большом расстоянии от зеркальца прибора до шкалы и небольших отклонениях системы можно считать отсчеты по шкале (BC на фиг. 2) пропорциональными углу α. При больших отклонениях нужно из величины отсчета по шкале вычесть небольшую поправку, согласно приводимой таблице:

Расстоян. шкалы от зеркальца	Отсчет по шкале		
	100	200	300
1000	0,3	2,6	8,5
1500	0,1	1,2	4,0
2000	0,1	0,7	2,2

Все величины в таблице даны в *mm*. Чем меньше расстояние до шкалы (AB на фиг. 2) и чем больше отклонение, тем больше поправка.

Прецезионные (точные) приборы, отклонение подвижной системы которых указывается стрелкой на шкале, для уменьшения влияния положения глаза наблюдателя снабжают зеркальной шкалой (фиг. 4); при отсчете по такой шкале стрелка должна покрывать свое изображение в зеркале. *.

Фиг. 4.

После того, как остановились на определенном методе измерения, чертят схему включения приборов и осуществляют ее простейшим способом по возможности нагляднее. Если имеют дело с сильными токами и относительно высокими напряжениями, то всегда следует ввести в цепь двухполюсный выключатель и предохранители. Измерительные приборы нужно выбирать с такой шкалой, чтобы отсчеты были возможно большими. Чтобы выбрать сопротивления, сначала примерным подсчетом определяют по потере напряжения их приближенную величину в омах и затем выбирают размеры в зависимости от предполагаемой силы тока и длительности включения. Далее перед началом опыта следует убедиться в исправности приборов, полярности и действительных пределах шкал, — это необходимо для того, чтобы не пришлось менять приборов среди опыта. Особые правила, которые нужно применять в отдельных случаях, будут указаны в дальнейшем при описании соответствующих измерений.

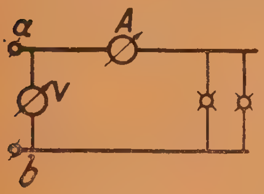
ОТДЕЛ I.

Электрические измерения.

1.* Амперметры и вольтметры.

Приборы для измерения силы тока, шкала которых градуирована в амперах, называются **амперметрами**.

Приборы для измерения напряжения, шкала которых градуирована в вольтах, называются **вольтметрами**. Амперметры и вольтметры сходны по своему устройству; амперметры соответственно их назначению обладают незначительным собственным сопротивлением, включаются в цепь последовательно (фиг. 5), и через их систему проходит весь измеряемый ток (или ток пропорциональный измеряемому); в отличие от этого вольтметры обладают большим собственным сопротивлением, включаются в цепь параллельно (фиг. 5) между теми точками, разность потенциалов которых нужно измерить (точки *a* и *b* фиг. 5); через вольтметр проходит малый по силе ток, пропорциональный измеряемой разности потенциалов



Фиг. 5.

$$i_v = \frac{V_a - V_b}{R_v}$$

В современной технике применяются амперметры и вольтметры следующих систем:

1) тепловые приборы;

2) приборы с подвижной катушкой и неподвижным постоянным магнитом, их называют также „гальванометрическими приборами“, „приборами системы Депре (Deprez)“ и „магнитными приборами“;

3) электродинамические приборы (измеряемый ток, или часть его, протекает через подвижную и неподвижную катушки):

а) без железа,

б) с железом — „ферродинамические“;

4) электромагнитные приборы (приборы с мягким железом в соленоиде);

5) индукционные приборы

а) с вращающимся магнитным полем — „приборы по Феррарису (Ferraris)“,

б) с электромагнитным экраном — система Бенишкэ (Benischke)

6) электростатические вольтметры.

У всех амперметров отклонение стрелки есть функция от силы тока, проходящей через катушки (или нить) прибора. Однако, через прибор можно пропустить ограниченную, в зависимости от системы, силу тока, именно не больше

0,2 А через одну нить теплового прибора и

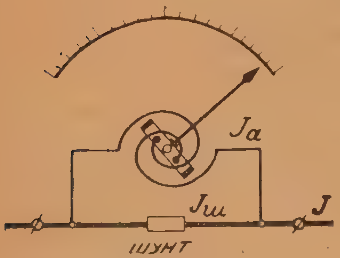
5 А при нескольких нитях;

0,1—0,2 А через подвижную катушку прибора системы Депре;

0,1—0,2 А через подвижную катушку электродинамического прибора,

1000 А через катушку электромагнитного прибора и

200 А через катушки индукционного прибора.



Фиг. 6.

Поэтому во многих случаях через амперметр проходит не весь измеряемый ток, а только меньшая часть его, большая же часть тока проходит через шунт (фиг. 6), небольшое сопротивление, включенное параллельно прибору. В этом случае вся сила тока $J = J_а + J_ш$, где $J_а$ — сила тока в амперметре, $J_ш$ — сила тока в шунте.

Обозначим через $E_а$ — напряжение на зажимах амперметра, $r_а$ — сопротивление амперметра, $r_ш$ сопротивление шунта.

Имеем:

$$E_а = J_а \cdot r_а \quad \text{и} \quad E_а = J_ш \cdot r_ш,$$

отсюда

$$\frac{J_ш}{J_а} = \frac{r_а}{r_ш}, \quad J_ш = \frac{J_а \cdot r_а}{r_ш};$$

на основании чего

$$J = J_а + J_а \cdot \frac{r_а}{r_ш} = J_а \left(1 + \frac{r_а}{r_ш}\right) = J_а K_ш.$$

Величину $K_ш = 1 + \frac{r_а}{r_ш}$ называют шунтирующим множителем. Обычно делают сопротивление шунта $r_ш = \frac{1}{9}, \frac{1}{99}, \frac{1}{999}$ от $r_а$ и следовательно $K_ш = 10, 100, 1000$. Шкала шунтированного прибора при этом может быть проградуирована на всю силу тока J.

При переменном токе вместо шунтов обычно применяют трансформаторы тока (см. § 29).

Амперметр в цепи тока представляет собою некоторое сопротивление; желательно чтобы это сопротивление было по возможности меньше, так как им обусловливается потеря напряжения в приборе и расход энергии. Для различных систем амперметров на 5 ампер средние величины напряжения на клеммах, при отклонении стрелки на всю длину шкалы следующие:

Тепловые амперметры	0,12 V
Амперметры с подвижной катушкой	0,05—0,1 V
Электродинамические амперметры	2 V
Электромагнитные амперметры	0,12 V
Индукционные амперметры	0.1 V

Сопротивление катушки вольтметра относительно невелико и, кроме того, зависит от температуры, поэтому, чтобы увеличить это сопротивление и устранить ошибку, вызываемую влиянием температуры, последовательно с катушкой включают добавочное сопроти-

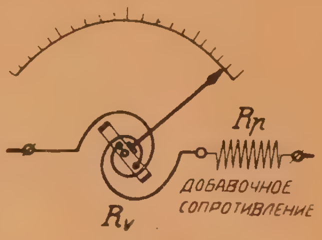
вление из материала с малым температурным коэффициентом (фиг. 7). Это добавочное сопротивление R_p должно быть не меньше пятикратного сопротивления катушки вольтметра.

Тогда:

$$V_a - V_b = i_v \cdot (R_v + R_p) = i_v \cdot R_v \left(1 + \frac{R_p}{R_v}\right) = i_v \cdot R_v \cdot K_p$$

$K_p = 1 + \frac{R_p}{R_v}$ называют реостатирующим множителем.

Один вольтметр с набором добавочных сопротивлений может служить для измерения различных напряжений. В этом случае обыкновенно $R_p = 9{,}99{,}999$ от R_v и, следовательно $K_p = 10{,}100{,}1000$. Желательно, чтобы сопротивление вольтметра было возможно больше, чтобы сила тока в приборе и потери энергии были меньше; в зависимости от системы, современные вольтметры имеют следующие сопротивления на 1 вольт шкалы:



Фиг. 7.

тепловые	10 Ω
с подвижной катушкой . . .	100 Ω
электродинамические	20 Ω
электромагнитные	10 Ω

(например сопротивление электромагнитного вольтметра со шкалой на 150 вольт будет приблизительно 150 × 10 = 1500 Ω). Сопротивление индукционных вольтметров меняется в зависимости от напряжения, сопротивление электростатических вольтметров практически равно бесконечности. Для напряжений переменного тока свыше 600 вольт добавочными сопротивлениями не пользуются, а включают вольтметр через трансформатор напряжения (см. § 29). Добавочные сопротивления и шунты делаются из материала с очень малым температурным коэффициентом—манганина или константана, их помещают в зависимости от размера и пред'являемых требований внутри или вне кожуха прибора. Потребление мощности внутри кожуха прибора не должно быть больше 5—10 ватт (в зависимости от размеров прибора).

Применение шунтов, добавочных сопротивлений и измерительных трансформаторов называют расширением шкалы прибора (в $K_ш$ и K_p раз).

I) Тепловые приборы.

Металлическая (платиноиридиевая или платиносеребряная) проволока („нить“) удлиняется при прохождении тока вследствие нагревания. Количество тепла, получаемое в единицу времени проволокой при этом пропорционально квадрату эффективной силы тока ($J^2_{эф}\ R_{пр}$) и совершенно не зависит от числа периодов и формы кривой тока. Кардью (Cardew) впервые воспользовался этим удлинением проволоки для измерения силы тока. Само по себе это удлинение очень незначительно, почему для измерения употребляют следующий прием:

Ток протекает через горизонтально натянутую нить $AB = 2a$ (фиг. 8). В середине AB, перпендикулярно к ней прикреплена бронзовая нить CD. От середины E последней идет третья проволока, обернутая около ролика и натянутая пружиной F. Ролик соединен со стрелкой.

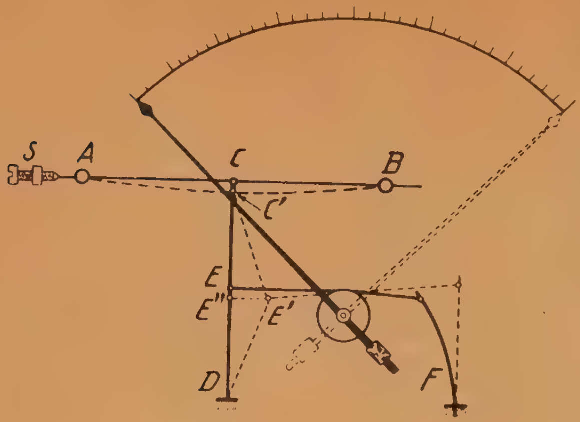
При прохождении тока по проволоке AB, точка C, вследствие удлинения AB, опустится в C', точка E сдвинется в E' и ролик со стрелкой повернется. На фиг. 8 это положение нанесено пунктиром. Провес $CC' = \epsilon$ можно определить из прямоугольного $\triangle ACC'$:

$$\epsilon^2 + a^2 = (a + \delta)^2,$$

где 2δ обозначает удлинение проволоки при прохождении тока, отсюда

$$\epsilon = \sqrt{2a} \cdot \sqrt{\delta},$$

так как δ^2 можно пренебречь по сравнению с остальными величинами.



Фиг. 8.

Опустим теперь из E' на CD перпендикуляр $E'E'' = \tau$ и обозначим длину $CE = C'E' = E'D$ через b; тогда на основании того, что $\triangle E''E'D$ прямоуголен и $EE'' = \frac{\epsilon}{2}$, получим:

$$b^2 = \left(b - \frac{\epsilon}{2}\right)^2 + \tau^2,$$

откуда $\tau = \sqrt{b} \cdot \sqrt{\epsilon}$, если опять пренебречь ϵ^2 по сравнению с другими величинами; подставляя сюда значение ϵ получаем

$$\tau = \sqrt[4]{\delta} \cdot \sqrt{b} \cdot \sqrt[4]{2a}.$$

Эта величина пропорциональна углу поворота ролика и отклонению стрелки и измеряется ими.

Возьмем числовой пример: $2a = 81$ mm, $2b = 50$ mm и $\delta = 1$ mm; по последней формуле получаем $\tau = 15$ mm, т.-е. непосредственно измеряется величина в 15 раз большая, чем само удлинение δ нити AB.

Описанное приспособление служит только одним из примеров подобных конструкций.

Демпфером у приборов этой системы служит легкий аллюминиевый диск, надетый на ось ролика и вращающийся между полюсами постоянного магнита. Вся система укреплена на плите из латуни и железа, имеющей тот же коэффициент расширения, как и тепловая нить (AB), — благодаря этому сильно уменьшено влияние температуры окружающей среды на показания прибора. Точная установка стрелки на нуль достигается регулированием натяжения нити винтом S. При перегрузке на 30% нить уже перегорает, поэтому прибор защищают плавким предохранителем. Через нить можно пропустить только небольшую силу тока, поэтому тепловые амперметры на силу тока свыше 5 амп. всегда снабжены шунтами (для сил тока меньше 5 ампер иногда включают параллельно несколько нитей).

Достоинства этой системы.

1. Прибор пригоден для постоянного и переменного тока при одной и той же шкале.

2) Показания прибора почти не зависят от внешних магнитных и электрических полей.

3) Дешевизна и простота конструкции.

Эти ценные свойства, однако, не могут искупить ряда крупных недостатков, именно:

1) Непостоянство нуля, вследствие изменения натяжения нити при переменах температуры среды, внешних толчках и т. п. Регулирование натяжения специальным винтом в промышленной практике очень неудобно и кроме того не устраняет искажения результатов отсчета при неправильном нуле.

2) Прибор очень чувствителен к перегрузкам, а плавкие предохранители в заводской практике неудобны.

3) Крупный расход энергии в приборе и шунтах, обусловливаемый применением электротермического принципа,—в отношении расхода энергии, приборы этой системы стоят среди всех других на первом месте.

4) Неравномерность шкалы („квадратичная шкала"),—деления сильно сближены в начале и расходятся в конце—это затрудняет отсчет, когда стрелка устанавливается между делениями, что конечно, чаще всего и бывает.

5) Прибор не может следовать за быстрыми изменениями нагрузки в цепи тока.

Вообще по точности показаний приборы этой системы стоят на последнем месте.

Для измерения токов высокой частоты применяют во избежание влияния поверхностного эффекта особые конструкции [2].

2) Приборы с подвижной катушкой.

В. Томсон (W. Thomson), Депре, Вестон (Weston).

Стальной магнит A (фиг. 9) создает сильное магнитное поле. Его полюсные наконечники B, сделанные из мягкого железа, образуют часть цилиндрической поверхности; посредине между ними для уменьшения сопротивления магнитной цепи, неподвижно укреплен цилиндр C из мягкого железа; между ним и полюсными наконечниками остается воздушный зазор около 1 *mm.* с каждой стороны. Силовые линии поля H в воздушном зазоре направлены радиально и равномерно распределены по окружности. Около цилиндра C может поворачиваться в воздушном зазоре укрепленная на рамочке катушка. Через эту катушку и пропускается измеряемый ток (или часть его); подводится он в катушку через две спиральные пружинки.

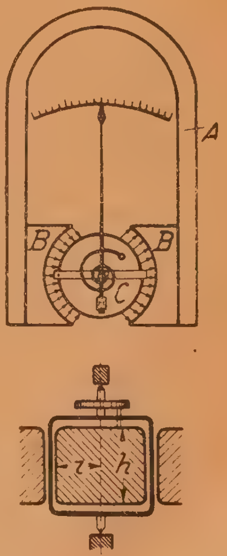
Вращающий момент M подвижной системы в дино-сантиметрах будет

$$M = 0{,}1\, H \cdot h \cdot 2 \frac{d}{2} n \cdot i$$

или

$$M = \frac{H \cdot S \cdot n \cdot i}{10},$$

где h длина сторон катушки, параллельных оси цилиндра C, $\frac{d}{2}$ половина ширины катушки, или радиальное расстояние воздушного зазора от оси вращения, n—число витков катушки, S—площадь, охватываемая одним ее витком, i—сила тока в амперах.



Фиг. 9.

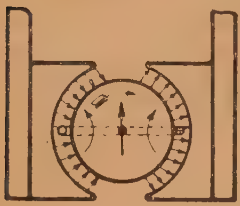
Противодействующий момент создается кручением спиральных пружинок, этот момент мы можем принять равным $C.\alpha$, где α—угол кручения. При равновесии системы

$$\frac{H \cdot S \cdot n \cdot i}{10} = C \cdot \alpha \qquad \text{или} \qquad i = \frac{C \cdot 10}{H \cdot S \cdot n} \alpha = Const. \ \alpha .$$

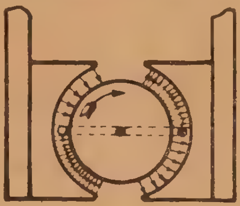
В технических амперметрах и вольтметрах вращающий момент при полном отклонении около 1 *gcm*, произведение $i.n$ около 1 ампер-витка; сила поля H обычно между 500 и 3.000 единиц *cgs* (горизонтальная составляющая поля земного магнитизма 0,2 единицы). Направление вращения системы определяется проще всего из того соображения, что линии магнитного поля катушки стремятся совпасть по направлению с линиями поля H.

На фиг. 10 оба поля нанесены независимо друг от друга, на фиг. 11 дано результирующее поле и стрелкой указано направление поворота катушки.

Хорошего демпфирования добиваются тем, что наматывают катушку на медную или аллюминевую рамочку. При вращении катушки в этой рамке возбуждаются токи Фуко, тормозящие движение. Кроме того, в качестве второго фактора демпфирования действуют токи, индуктируемые в самой катушке, благодаря движению ее в магнитном поле; эти токи пропорциональны силе поля, скорости вращения катушки и обратно пропорциональны сопротивлению цепи катушки.



Фиг. 10.



Фиг. 11.

Приборы этой системы широко применяются в технике в качестве амперметров и вольтметров для постоянного тока. По этой же системе строят большую часть так называемых „эталонных“ приборов, с которыми сверяют показания приборов других систем. Качества прибора зависят от постоянства магнитного поля и пружин. Постоянства магнитного поля достигают, во-первых, выбором для магнита материала с большой коэрцетивной силой (остаточным намагничением), обычно для этого берут вольфрамовую сталь, во вторых тем, что по возможности почти полностью замыкают магнитную цепь и, наконец, тем, что подвергают магнит так называемому искусственному состариванию, именно магнит подвергают действию слабых размагничивающих сил, легкому нагреванию, механическим толчкам и т. п. Особенно известны своими высокими качествами магниты фирмы Вестон (гарантия фирмы на 10 лет).

При всех точных измерениях ось катушки прибора должна стоять вертикально, чтобы на показания не повлиял провес пружинки и легкий эксцентриситет оси.

Преимущества этой системы приборов следующие:

1) равномерность шкалы, вследствие линейной зависимости между i и α обусловливаемой равномерностью поля;

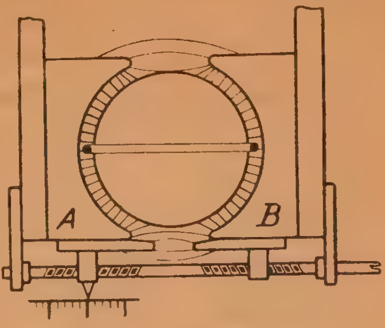
2) большая чувствительность, благодаря тому, что вращающий момент пропорционален произведению $i.H$, при чем H очень велико, вместе с тем эта чувствительность не связана с потреблением мощности;

3) малое потребление мощности в самом приборе;

4) нечувствительность к влиянию внешних магнитных полей, благодаря большой величине H;

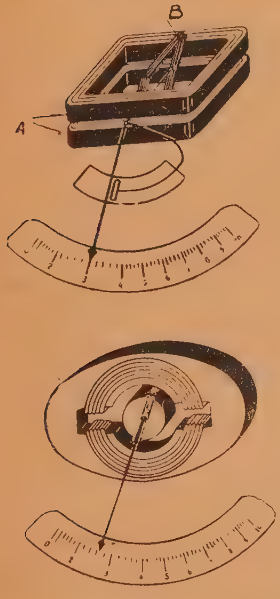
5) апериодичность, т.-е. свойство катушки вследствие хорошего демпфирования устанавливаться в соответствующем положении сразу почти без колебаний.

Недостатком приборов этой системы является то, что они пригодны только для постоянного тока. При переменном токе с каждой переменой направления тока должно было бы меняться и направление вращения катушки,—катушка же вследствие инерции не может поспеть, за столь быстрыми переменами, почему стрелка прибора, слегка дрожа, остается на нуле.



Фиг. 12.

Точные амперметры и вольтметры этой системы иногда снабжают магнитным шунтом, с помощью которого показания прибора можно точно отрегулировать по эталону. Магнитный шунт состоит из двух железных пластин A и B (фиг. 12), передвигая которые с помощью винта, можно частично изменять силу поля в воздушном зазоре и тем самым и постоянную прибора.



Фиг. 13.

3) Электродинамические приборы.

а) Приборы без железа.

Измеряемый ток (или часть его) протекает через две катушки—неподвижную A и подвижную B (фиг. 13). Согласно закона Ампера о взаимодействии проводников с токами, подвижная катушка будет стремиться занять такое положение, чтобы направление ее силового потока совпало с направлением поля главной катушки. Противодействующий момент пропорционален углу кручения двух пружинок, которые вместе с тем служат для подвода тока к подвижной катушке. Вращающий момент катушки будет пропорционален силе токов i_1 и i_2, протекающих по неподвижной и подвижной катушкам,—поэтому при равновесии $i_1 \cdot i_2 = C \cdot \alpha$ или, если катушки включены последовательно и $i_1 = i_2 = i$,

$$i^2 = C \cdot \alpha$$

При переменном токе i будет мгновенное значение силы тока, по мере изменения i будет изменяться и момент вращения, уменьшаясь до нуля; при перемене направления тока переменится и направление поля в обоих катушках, почему направление момента вращения останется неизменным. Так как эти изменения происходят очень быстро, то подвижная катушка прибора не может за ними следовать, а даст некоторое отклонение α, соответствующее

средней величине вращающего момента за целый период переменного тока, именно

$$C \cdot \alpha = \frac{1}{T}\int_0^\tau i^2 dt\ ,$$

эффективное значение силы переменного тока

$$J_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^\tau i^2 \cdot dt}$$

подставляя получаем:

$$C \cdot \alpha = J^2_{эф}\ ;$$

следовательно электродинамический прибор пригоден для измерения постоянного и переменного токов, в последнем случае он измеряет эффективное значение переменного тока независимо от числа периодов; в обоих случаях, как видим, зависимость между углом отклонения и силой тока не линейная. Если самоиндукцией прибора при переменном токе можно пренебречь по сравнению с его уаттным сопротивлением, то прибор можно градуировать с помощью постоянного тока для измерения переменных токов.

Так как при отклонении подвижной системы взаимное положение катушек изменяется, то C непостоянно, почему прибор градуируют эмпирически, путем сравнения с показаниями эталонного прибора. В случае, когда самоиндукцией прибора пренебречь нельзя, поправочный множитель для шкалы, градуированной при постоянном токе, будет $\frac{\sqrt{r^2 + w^2L^2}}{r}$, где r общее сопротивление всего прибора; однако общая самоиндукция системы катушек L по мере увеличения отклонения подвижной катушки увеличивается, почему практически пользоваться этой поправкой нельзя.

В электродинамических вольтметрах обе катушки соединяют последовательно одну с другой и с добавочным сопротивлением, благодаря чему в вольтметре легко свести к незначительной величине wL по сравнению с r. Так как через подвижную катушку нельзя пропустить большую силу тока, то в электродинамических амперметрах катушки включены параллельно. Сопротивление подвижной катушки всегда относительно велико и сильно зависит от силы тока (благодаря большому температурному коэффициенту меди); чтобы свести эту ошибку к незначительной величине последовательно с подвижной катушкой включают добавочное сопротивление из материала с очень малым температурным коэффициентом (манганина). Это сопротивление раза в четыре больше сопротивления подвижной катушки. Для этой же цели последовательно с толстой катушкой включают небольшое добавочное сопротивление.

Чтобы прибор можно было градуировать при постоянном токе для измерений переменного, нужно чтобы распределение тока в катушках было одно и то же при постоянном и при переменном токах, следовательно, отношение уаттного сопротивления к безуаттному в обоих ветвях должно быть одинаково. Полная индукция для одной катушки

равна сумме ее самоиндукции и взаимной индукции со второй катушкой; таким образом для неподвижной катушки

$$L_{b_1} = L_1 + M$$

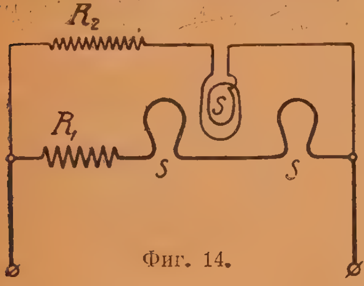
и для подвижной

$$L_{b_2} = L_2 + M \, .$$

Нужно, чтобы

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_{b_1}}{L_{b_2}} = \frac{L_1 + M}{L_2 + M}$$

здесь R_1 и R_2 обозначают уаттные сопротивления обоих ветвей. Однако, взаимная индукция M меняется при вращении подвижной катушки, почему это условие может быть выполнено только приближенно, для чего делают M относительно небольшим; однако, в этом направлении нельзя итти очень далеко по механическим причинам, так как изменение M обуславливает величину работы, отдаваемой на вращение стрелки. По этой причине приходится прибегать к другому способу, именно L_{b1} и L_{b2} делают малыми по сравнению с R_1 и R_2, включая по добавочному сопротивлению в цепь каждой катушки (фиг. 14); благодаря этому изменение индукции лишь незначительно отзывается на распределении тока,



Фиг. 14.

$$\frac{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_{b_1}^2}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_{b_2}^2}} \cong \frac{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}} \cong \frac{R_1}{R_2}$$

Однако, благодаря добавочным сопротивлениям в цепи, амперметр этой системы будет поглощать много энергии. Приборы этой системы обычно снабжают воздушным демпфером.

Основное достоинство этой системы то, что при хорошей конструкции приборы одинаково пригодны для постоянного и для переменного тока. Их употребляют главным образом в качестве контрольных приборов и для лабораторных измерений.

Недостатки этой системы следующие:

1) поле в приборе очень слабо (около 50 линий на cm^2), почему прибор очень ч у в с т в и т е л е н к в н е ш н и м в л и я н и я м, как-то: близости железных тел, проводников с током, электромашин и т. п.;

2) неравномерность шкалы, так как отклонения стрелки приблизительно пропорциональны квадрату силы тока;

3) слабость поля обусловливает малую величину вращающего момента и тем самым относительно м а л у ю ч у в с т в и т е л ь н о с т ь прибора;

4) б о л ь ш о е с о п р о т и в л е н и е амперметра, как уже указано выше.

b) Ферродинамические приборы[3]).

Этот тип отличается от вышеописанного электродинамического прибора без железа тем, что магнитный поток катушек по возможности замкнут через железо. Обычно под электродинамическими приборами понимают приборы без железа. Неподвижная катушка прибора снабжается железным сердечником, а подвижная вращается вокруг железного же цилиндра сердечника (см. фиг. 13 внизу). Во избежание токов Ф у к о сердечники набраны из взаимно изолированных

листов железа. Вращение катушки обусловлено так же, как и в приборах без железа, взаимодействием проводников с током. Благодаря присутствию железа, магнитный поток практически можно считать не зависящим от взаимного положения катушек ($C \cong const$).

Достоинства этого типа приборов следующие:

1) сильное магнитное поле и потому бо́льшая чувствительность, чем у прибора без железа;

2) по этой же причине нечувствительность к влияниям внешних полей.

Недостатки:

1) основной недостаток тот, что вследствие гистерезиса в сердечниках деления шкалы прибора различны для постоянного и переменного токов;

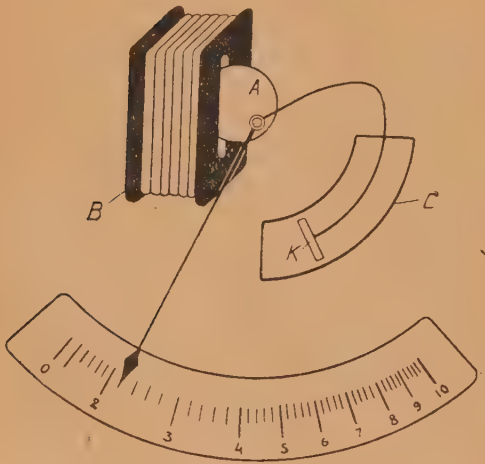
2) неравномерность шкалы;

3) в цепь подвижной катушки вольтметра иногда последовательно включают конденсатор, в этом случае прибор конечно не будет давать отклонения при постоянном токе.

Для промышленной практики в качестве ходового типа приборы этой системы слишком дороги, почему ими пользуются только, как точными приборами переменного тока, но в этом отношении с ними успешно могут конкурировать индукционные приборы.

4) Электромагнитные приборы [1]).

Современные приборы этой системы разделяются на два основные типа. Схема устройства приборов первого типа („приборы с плоской катушкой") показана на фиг. 15. Пластина A из мягкого железа укреплена на оси в поле неподвижной катушки B, через которую протекает измеряемый ток. Пластина намагничивается, при чем на нее действует сила, стремящаяся втянуть ее в наиболее интенсивную часть поля катушки, иначе говоря, — железо стремится занять такое положение, при котором сопротивление магнитной цепи сведется к возможно минимальной величине.



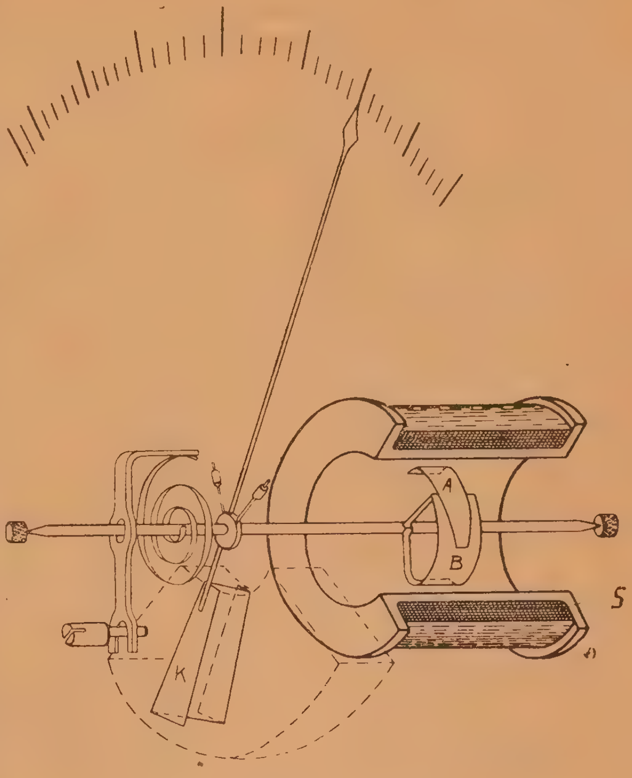
Фиг. 15

При перемене направления тока переменятся и магнитные полюса железа, почему направление отклонения останется неизменным. Сила, действующая на подвижную часть, приблизительно пропорциональна квадрату эффективной силы тока через катушку, т. к. она пропорциональна произведению силы поля катушки на намагничение железа; сила же поля катушки и намагничение железа пропорциональны силе тока. Поршенек K, помещенный с небольшим зазором в закрытом с одного конца цилиндре C, служит демпфером.

Приборы второго типа этой системы („приборы с круглой катушкой") действуют благодаря взаимному отталкиванию двух частей из мягкого железа, одновременно намагничиваемых одним и тем же током, проходящим через катушку. Схема устройства приборов этого

типа показана на фиг. 16: *A* — неподвижная пластина из мягкого железа, *B* — подвижная, соединенная со стрелкой, *S* — намагничивающая катушка, *K* — крыло демпфера (коробка показана пунктиром). Основные качества обоих типов одни и те же. В качестве противодействующей силы в обоих случаях применяют грузики-противовесы или пружины.

При техническом выполнении стараются придать подвижной системе прибора возможно меньший вес и обойтись возможно меньшим числом ампервитков (200—300 *AW* для первого типа и 300—400 *AW* для второго). Благодаря влиянию гистерезиса показания прибора при переменном токе меньше, чем при постоянном (до 5%). Насыщением железа пользуются для получения более равномерной шкалы; таким образом и соответствующим выбором формы железа достигают того, что шкала на $^4/_5$ длины имеет равномерные деления.



Фиг. 16.

Амперметры электромагнитной системы шунтами обыкновенно не снабжают, а для больших сил тока делают намагничивающую катушку из небольшого числа витков толстой медной ленты (для 1000 A — 1 виток); при переменном токе прибор включают через трансформатор тока.

Преимущества этой системы следующие:

1) пригодность для постоянного и для переменного токов;

2) дешевизна и простота конструкции;

3) выносливость по отношению к перегрузкам, — в этом отношении с электромагнитными приборами могут соперничать только индукционные;

4) механическая прочность.

К этой системе принадлежит большинство амперметров и вольтметров фабричных и заводских установок.

Недостатки этой системы таковы:

1) для постоянного и переменного токов отклонения стрелки различны вследствие влияния гистерезиса; показания прибора зависят от частоты и формы кривой переменного тока;

2) неполная апериодичность:

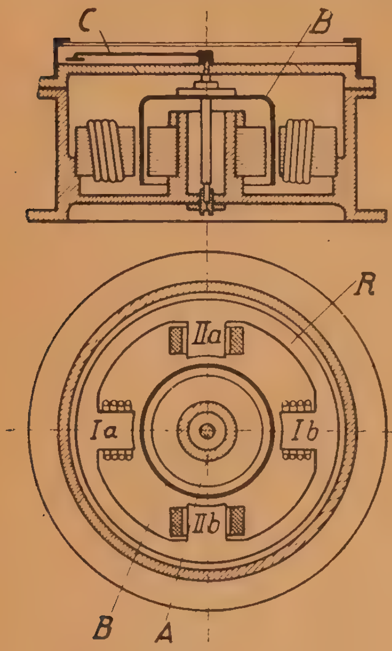
3) магнитобоязнь (т.-е. зависимость показаний прибора от внешних магнитных полей); чтобы уменьшить ее, приборы снабжают кожухами из мягкого железа;

4) неравномерность шкалы;
Для точных измерений приборы этой системы не употребляются.

5) Индукционные приборы.

а) Приборы с вращающимся магнитным полем—Феррариса.

Кольцо *R*, фиг. 17, сделано из листового железа и снабжено с внутренней стороны четырьмя выступами I_a, I_b, II_a и II_b. На эти выступы надето по катушке, эти катушки соединены последовательно в две цепи I_a с I_b и II_a с II_b. Токи в обмотках I и II сдвинуты по фазе, напр., благодаря включению в одну из цепей катушки самоиндукции. Иногда одну из обмоток (т.-е. пару катушек) делают из небольшого числа витков толстой проволоки и замыкают накоротко,—индуктируемый в ней ток будет двинут по фазе почти на 90° по отношению к току в другой обмотке. В середине между катушками укреплен цилиндрический сердечник *A* из листового железа. В зазоре между ним и катушками, на оси, пропущенной через сердечник *A*, вращается аллюминевый барабан *B* в форме опрокинутого стаканчика; он соединен со стрелкой *C*.



Фиг. 17.

При включении прибора в цепь переменного тока обмотки I и II, вследствие сдвига фаз токов, создадут вращающееся магнитное поле, которое индуктирует в барабане *A* токи Фуко, последние же по принципу асинхронного мотора вызовут вращение барабана в направлении вращения магнитного поля. Противодействующий момент создается спиральной пружиной.

Мгновенные значения магнитных потоков обмоток будут

$$\Phi_1 = \Phi_{1\,max} \cdot \sin(2\pi\nu t)$$

и

$$\Phi_2 = \Phi_{2\,max} \cdot \sin(2\pi\nu t - \varphi)$$

где φ—угол сдвига фаз между токами в обмотках I и II, $\Phi_{1\,max}$ и $\Phi_{2\,max}$ амплитуды магнитных потоков; эти потоки индуктируют в барабане соответственно эл. дв. силы и токи

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -2\pi \cdot \nu \cdot \Phi_{1\,max} \cdot \cos(2\pi\nu t)$$

$$i_1 = \frac{e_1}{r}$$

$$e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -2\pi \cdot \nu \cdot \Phi_{2\,max} \cdot \cos(2\pi\nu t - \varphi)$$

$$i_2 = \frac{e_2}{r}$$

где r—сопротивление аллюминиевого барабана; взаимодействие индуктированных в барабане токов и магнитного поля обусловит вращающие моменты

$$M_1 = -\frac{2\pi \cdot \nu \cdot \Phi_{1\,max} \cdot \Phi_{2\,max}}{r} \cdot \mathrm{Cos}\,(2\pi\nu t) \cdot \mathrm{Sin}\,(2\pi\nu t - \varphi);$$

$$M_2 = -\frac{2\pi \cdot \nu \cdot \Phi_{1\,max} \cdot \Phi_{2\,max}}{r} \cdot \mathrm{Cos}\,(2\pi\nu t - \varphi) \cdot \mathrm{Sin}\,(2\pi\nu t);$$

момент вращения барабана будет

$$M = M_1 - M_2 = \frac{2\pi \cdot \nu \cdot \Phi_{1\,max} \cdot \Phi_{2\,max}}{r} [\mathrm{Cos}\,(2\pi\nu t - \varphi) \cdot \mathrm{Sin}\,(2\pi\nu t) -$$

$$- \mathrm{Sin}\,(2\pi\nu t - \varphi) \cdot \mathrm{Cos}\,(2\pi\nu t)] = \frac{2\pi \cdot \nu \cdot \Phi_{1\,max} \cdot \Phi_{2\,max}}{r} \cdot \mathrm{Sin}\varphi \cong 2\pi C \frac{\nu \cdot \mathrm{Sin}\,\varphi}{r} J^2,$$

где J вся сила тока через прибор. Как видим из формулы, показания прибора зависят от частоты и температуры (благодаря относительно большому температурному коэффициенту аллюминия, с изменением температуры изменяется r); при конструировании этих приборов стремятся к тому, чтобы иметь $\angle\varphi = 90^0$, для чего в приборах фирмы Сименс-Гальске применено включение мостиком,—„схема Гэргеса" (Görges [5]). Как видно из формулы, шкала должна иметь неравномерные „квадратичные" деления, однако в хороших конструкциях этого удается избежать с помощью системы грузиков, и особой конструкции сердечника, которые дополняют действие пружины; с помощью этих приспособлений получают равномерные деления для большей части шкалы.

Достоинства этого типа приборов следующие:

1) большая выносливость к перегрузкам;

2) чувствительность, благодаря сильному магнитному полю;

3) апериодичность; приборы хорошо демпфированы с помощью постоянного магнита (не показан на чертеже), защищенного от переменного магнитного поля, между полюсами которого вращается аллюминиевый диск, насаженный на общую ось с барабаном *A*;

4) почти полная независимость от внешних магнитных полей;

5) длинная шкала, при хорошей конструкции, с равномерными делениями в большей своей части.

Недостатки:

1) приборы пригодны только для переменного тока, при чем показания их зависят от частоты (почему на приборах этой системы всегда обозначено, для какой частоты они градуированы) и формы кривой тока;

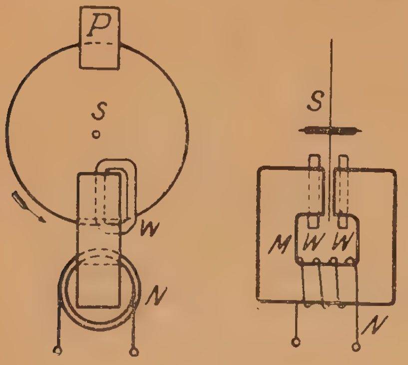
2) зависимость показаний от температуры среды;

3) неравномерность шкалы близ нулевого положения стрелки.

b) Приборы с электромагнитными экранами — Бенишке (Benischke) [6].

Между полюсами электромагнита (*M*, фиг. 18) собранного из листового железа, вращается металлический диск *S*, снабженный стрелкой. На электромагнит намотана катушка *N*, через которую проходит измеряемый ток. Полюсные поверхности на 80% закрыты металлическими экранами. Переменный магнитный поток индуктирует в экранах и в части диска *S*, находящейся не под экранами, токи Фуко, при

чем в части диска под экранами эти токи не появляются, т. к. экраны почти не пропустят через себя силовых линий; вместо экранов можно взять коротко замкнутые катушки W, на фиг. 18. Экраны и часть диска вне экрана будут взаимно притягиваться и диск придет во вращение в направлении, показанном стрелкой. Прибор демпфируется токами Фуко, индуктируемыми в диске постоянным магнитом P и, кроме того, отчасти трением диска о воздух.



Фиг. 18.

Достоинства этого типа индукционных приборов почти те же, что и приборов „по Феррарису“, именно:

1) большая выносливость к перегрузкам;

2) чувствительность;

3) апериодичность;

4) независимость от влияния внешних магнитных полей;

5) очень длинная шкала, до 300°;

Недостатки:

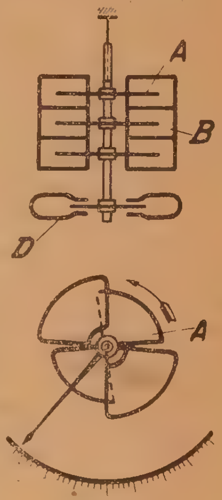
1. Приборы эти пригодны только для переменного тока, при чем их показания сильно зависят от частоты и формы кривой тока;

2. Большая зависимость показаний от температуры среды (сопротивление диска и экранов);

3. Неравномерность шкалы;—чтобы достичь большей равномерности делений, прибор снабжают диском неправильной формы, так что по мере вращения между полюсами электромагнита остается все меньшая и меньшая часть диска.

Вообще же, несмотря на эти недостатки, приборы индукционной системы являются самыми точными приборами промышленного типа для переменного тока.

6) Электростатические вольтметры.



Фиг. 19.

Устройство этих приборов основано на принципе взаимного притяжения или отталкивания электрических зарядов. Схема устройства многокамерного вольтметра для низкого напряжения показана на фиг. 19. A—ряд легких металлических пластинок на общей оси, снабженной стрелкой; пластинки эти могут свободно вращаться внутри камер B, образуемых неподвижными пластинами. Подвижную систему соединяют с одним полюсом источника измеряемого напряжения, неподвижную—с другим,—пластины при этом будут взаимно притягиваться, вследствие чего подвижные пластины A будут входить в промежутки между неподвижными; противодействующий момент создается спиральными пружинками. D—демпфер, состоящий из металлического диска вращающегося между полюсами постоянного магнита.

В вольтметрах для измерения высоких напряжений (см. § 29) достаточно одной подвижной пластины.

Теория этих приборов изложена ниже в отделе об электрометре.

Емкость электростатических вольтметров порядка 0,00001 микрофарады. Для предупреждения короткого замыкания через прибор, последовательно с ним включают большое сопротивление (трубки с жидкостью или графитовые стержни). Прибор снабжают предохранительным искровым промежутком, длина которого меньше расстояния между пластинами подвижной и неподвижной систем.

Достоинства этой системы:

1) потребление энергии вольтметром практически равно нулю, что особенно ценно в цепях высокого напряжения, где они и находят широкое применение;

2) прибор одинаково пригоден и дает одни и те же отклонения при постоянном и переменном токах.

Недостатки:

1) незначительность сил, действующих в приборе, обусловливает относительную хрупкость прибора и непортативность — прибор боится всяких сотрясений;

2) неравномерность шкалы;

3) чувствительность к внешним электрическим полям.

---

[1]) См. также Heinke, Handbuch der Elektrotechnik, Leipzig (Hirzel, 1908); Kittler—Petersen Allgemeine Elektrotechnik, Stuttgart (Enke 1909); Niethammer, Elektrotechnisches Praktikum, Stuttgart (Enke); Jaeger, Elektrotechnische Messtechnik, Leipzig (Barth, 1922); Brion Leitfaden des elektrotechnischen Praktikums, Leipzig (Teubner, 1910): Gruhn, Elektrotechnische Meszinstrumente, Berlin (Springer, 1923). Keinath, Technik der elektrischen Messgeräte, München (Oldenburg 1923)

[2]) ETZ (31) 269 (1910); (32) 1134 (1911).

[3]) Terry, Phys. Rev. (21) 193 (1905); Abraham, Compt. Rend. (142) 993 (1906) Journ, de Phys. (1) 264 (1911); Sumpner—Phillips, Phil. Mag. (20) 309 (1910); Stroud—Oates, Phil, Mag. (6) 707 (1903).

[4]) Добровольский ETZ (34) 113 (1913).

[5]) Черданцев, Теория переменных токов, Москва, Госиздат 135 (1923).

[6]) ETZ. (20) 82 (1899).

2.* Гальванометры [1]).

I. Устройство.

Гальванометры применяются для обнаружения или измерения очень слабых токов. Более грубые приборы (чувствительность примерно $5 \cdot 10^{-6}$ *A*) снабжаются стрелкой и шкалой, к подвижной системе более чувствительных прикрепляют легкое зеркальце, которым и пользуются для суб'ективного или об'ективного отсчета отклонения этой системы от нулевого положения, отсюда название зеркального гальванометра.

Два основные типа гальванометров суть следующие:

A. Гальванометры с подвижным магнитом, и

B. Гальванометры с подвижной катушкой.

Гальванометры со специальным назначением: как-то, баллистический, дифференциальный, вибрационный, струнный и т. д. будут описаны в зависимости от назначения в соответствующих параграфах.

A. Гальванометры с подвижным магнитом.

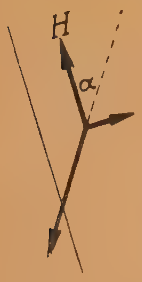
Представим себе кругообразный виток проволоки радиусом *r*, через который протекает некоторый ток *i*; пусть в середине витка

подвешена магнитная стрелка,—это будут основные части тангенс-буссоли—простейшего гальванометра с подвижным магнитом.

В середине витка сила поля в этом случае будет

$$H_k = 0{,}1 \int\limits_0^{2\pi r} \frac{i \cdot dl}{r^2} = \frac{0{,}2\pi \cdot i}{r} \cdot$$

Направление этого поля перпендикулярно к плоскости витка, и если эту последнюю установить в направлении магнитного меридиана, то направление результирующего поля образует с направлением земного поля H некоторый угол α (фиг. 20). Этот угол определяется отношением



Фиг. 20.

$$tg\alpha = \frac{H_k}{H},$$

где H обозначает горизонтальную составляющую земного магнитного поля. Если вращающий момент закручивания нити подвеса настолько мал, что им можно пренебречь, тогда тангенс угла отклонения будет мерой для силы тока i по формуле:

$$tg\alpha = \frac{H_k}{H} = \frac{0{,}2\pi}{r.H} i\,.$$

Из этой формулы следует, что угол отклонения не зависит от силы подвижного магнита, обратно пропорционален силе земного магнитного поля и прямо пропорционален силе поля, образуемого током i в витке. Чтобы усилить последнее при измерении слабых токов, вместо одного берут n витков. Тогда

$$i = \frac{r \cdot H}{0{,}2\pi \cdot n} \cdot tg\alpha \text{ амп.}$$

Однако эта формула вполне точна только в том случае, когда все витки во-первых, лежат в одной плоскости и во-вторых, имеют один и тот же радиус и общий центр, т.-е. эта формула верна, когда толщина катушки мала по сравнению с ее радиусом, так что для радиуса можно взять среднее значение; кроме того длина магнитной стрелки должна быть мала по сравнению с этим средним радиусом витков, чтобы магнит все время находился в равномерной части поля. В современных типах гальванометров с подвижным магнитом эти условия полностью не осуществлены, почему они не пригодны для абсолютных измерений силы тока.

Увеличение чувствительности гальванометров этой системы достигается посредством применения мультипликаторов—катушек с большим числом витков, катушек малого диаметра, тесно охватывающих подвижной магнит (микрогальванометр Розенталя [1]), и посредством астазирования внутреннего и внешнего. Первые два способа требуют устройства катушек с малым радиусом и большим числом витков; однако, в этом направлении нельзя итти очень далеко, т.-к. внешние витки катушки, по мере увеличения толщины последней, все меньше усиливают поле, а в то же время они увеличивают сопротивление катушки. Так как тангенс угла отклонения обратно пропорционален H земли, то при измерении слабых токов угол отклонения можно увеличить посредством

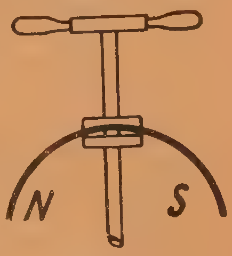
ослабления действия земного магнитного поля на подвижный магнит. Это достигается посредством так называемого внутреннего и внешнего астазирования.

Внутреннее астазирование. Астатическая система магнитов состоит из двух одинаковых магнитных стрелок, повернутых на 180° по отношению друг к другу и жестко соединенных между собой. Такая система магнитов находилась бы в состоянии равновесия в любом положении по отношению к земному магнитному полю. Практически однако оси магнитов никогда не будут точно параллельны, равным образом их магнитные моменты никогда не будут вполне равны.

В силу этого астатическая система магнитов может занять самое неожиданное положение равновесия.

Внешнее астазирование. В этом случае поле ослабляется с помощью одного или двух магнитов, благодаря чему уменьшается противодействующий момент и при той же силе тока увеличивается угол отклонения.

Астазирующие магниты устанавливают снизу или сверху подвижного магнита, так, чтобы их можно было поворачивать вокруг оси, поднимать и опускать. Кроме того, чтобы получить по возможности равномерное поле, их изгибают ввиде дуги вверх или соответственно вниз (фиг. 21).



Фиг. 21.

Время колебания недемпфированной подвижной системы, как показано ниже в § 32, обратно пропорционально квадратному корню из противодействующей силы; на основании этого можно определить степень астазирования, для чего нужно, удалив демпфирующее приспособление, сравнить длительность колебания при неослабленной силе земного поля и при астазировании.

Если результирующее поле очень слабо, то высокая чувствительность достигается ценой очень большого периода колебания, поэтому астазирование применимо только для коротких магнитов с малым моментом инерции.

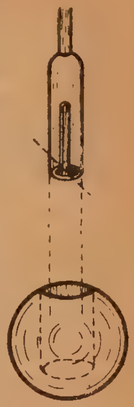
Дальнейшее неудобство представляет собой непостоянство земного поля; между 10 ч. утра и 6 ч. вечера горизонтальная составляющая поля земного магнитизма изменяется, в зависимости от времени года, в среднем на 1—4‰. При сильном астазировании может случиться, что зеркальце после полудня повернется на 180°.

Другой способ ослабления действия земного поля состоит в применении защитного кольца из мягкого железа или панцыря (магнитной брони). Впервые такую броню применил В. Томсон (1858). Она изготовляется из лучшего мягкого железа или мягкой литой стали.

При измерениях желательно, чтобы подвижная система возможно скорее принимала положение равновесия. Время колебания пропорционально корню квадратному из момента инерции и обратно пропорционально корню квадратному из магнитного момента,—поэтому следует стремиться к возможно более сильному намагничению стрелки. Так как магнитный момент пропорционален длине и сечению магнита, а момент инерции, для относительно вытянутых по форме (напр. длина относится к толщине, как 10:1) стержней, пропорционален сечению и третьей степени длины, то следует употреблять короткие магнитные стрелки. В таких коротких магнитах зато сильно скажется размагничивающее действие концов; чтобы избежать его В. Томсон заменил один магнит

несколькими тонкими короткими магнитами, наклеенными параллельно друг другу на тонкий кружок слюды (фиг. 22). Благодаря тонкости магнитов, размагничивающее влияние концов сильно уменьшается, а магнитный момент и момент инерции остаются почти те же, как и для одного магнита с массой, равной общей массе тоненьких магнитов.

Фиг. 22.



Фиг. 23.

Другое решение вопроса дал Сименс. Если сблизить концы магнита в n раз, то магнитный момент его уменьшится тоже в n раз, а момент инерции при этом уменьшиться в n^2 раз. На основании этого В. Сименс и придал магниту форму колокола с вырезом (фиг. 23).

Обе эти конструкции магнитов применяются и для астатических систем.

Демпфирование подвижной системы достигается самыми различными способами,—как-то, посредством:

a) воздушных демпферов, состоящих из крыльев из легкого материала (слюды или аллюминия), прикрепленных к подвижной системе; эти крылья тормозят ее движение, благодаря трению о воздух;

b) жидкостных демпферов, которые состоят из кружка или крыльев, прикрепленных к подвижной системе и погруженных в вязкую жидкость (машинное масло, глицерин); этот способ в настоящее время почти не применяется, так как влияние внутреннего трения жидкости слишком значительно по сравнению с крайне слабыми силами, действующими на подвижную систему гальванометра;

c) металлических (медных) масс вблизи магнита, движение магнита возбуждает в них токи Фуко и тормозит магнит — примером такого демпфера может служит медный шар (фиг. 23), которым снабжен гальванометр В. Сименса;

d) демпфирующего влияния токов, индуктируемых в самой катушке движением магнита,—это влияние можно усилить, намотав катушку на медную рамку.

Гальванометры с подвижным магнитом хорошей конструкции обладают очень высокой чувствительностью (до 10^{-13} A), однако они имеют ряд крупных недостатков, благодаря чему часто им предпочитают гальванометры с подвижной катушкой. Основным недостатком является сильная зависимость показаний прибора от внешних полей; простое перемещение железных масс, находящихся невдалеке от гальванометра, вызывает изменения направляющей силы и нулевого положения. Для защиты от этих влияний гальванометры снабжают панцырями и защитными кольцами из мягкого железа, однако все эти меры далеко не всегда достигают своей цели.

B. Гальванометры с подвижной катушкой.

Гальванометры этой системы устроены согласно вышеописанному принципу приборов с подвижной катушкой и неподвижным постоянным магнитом.

Подвижная катушка подвешена на плоской бронзовой нити, которая вместе с тем подводит ток; вторым проводником служит свободно навитая спиральная пружинка (почти не создающая противодействующего момента). Чувствительность прибора обратно пропорциональна силе кручения нити подвеса, а эта сила пропорциональна четвертой степени радиуса нити подвеса, следовательно небольшое

уменьшение этого радиуса сильно отзовется на чувствительности прибора. На основании этого берут возможно тонкую нить подвеса, но конечно при этом увеличивается длительность колебания системы. Подвижная система демпфируется токами, индуктируемыми в ней при вращении катушки в магнитном поле. Благодаря большой силе этого поля отклонения катушки не зависят от влияний внешних магнитных полей, что является основным преимуществом этой системы, благодаря которому гальванометры с подвижной катушкой получили широкое распространение, несмотря на то, что чувствительность их в общем меньше, чем гальванометров с подвижным магнитом. Следующие цифры могут дать представление о возможной чувствительности гальванометров этой системы:

Общее сопротивление	Сопротивление подвижной катушки	Длительность колебания	Отклонение на 1 мм при расстоянии шкалы 1 м. соответствует силе тока
10 000 Ω	200 Ω	12 сек.	8×10^{-10} *A*
3 Ω	1,3 Ω	6 сек.	3×10^{-8} *A*

2. Установка и градуирование зеркальных гальванометров.

А. Установка.

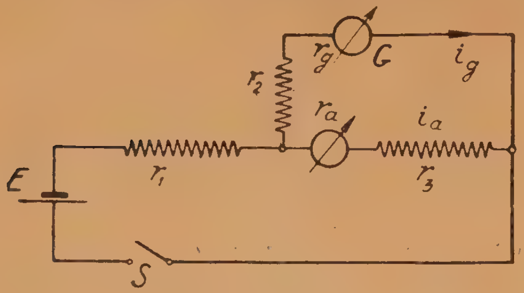
Гальванометры должны быть тщательно предохранены от всяких сотрясений, для чего их устанавливают на особых подвесах, а для особо точных измерений на специальных углубленных в почву фундаментах. Плоскость катушек гальванометров с подвижным магнитом должна быть установлена в направлении магнитного меридиана у не астазированных, а у астазированных в зависимости от положения равновесия системы магнитов. Обычно гальванометры применяют для нулевых способов (когда нужно добиться полного отсутствия тока в определенной ветви) и значительно реже для измерения слабых токов. Чтобы уменьшить и регулировать чувствительность гальванометров, пользуются шунтами, особенно удобен так называемый „универсальный шунт“.

В. Градуирование с помощью известных электродвижущей силы и сопротивления.

Включают последовательно гальванометр, нормальный элемент и большое известное регулируемое сопротивление. Общее сопротивление при этом должно быть таково, чтобы максимальная сила тока (при наибольшем отклонении подвижной системы гальванометра) не превышала 5.10^{-5} амп. Силу тока определяют как частное от деления электродвижущей силы элемента на общее сопротивление цепи, — реостата и гальванометра (пренебрегая внутренним сопротивлением элемента); сопротивление гальванометра при этом мало по сравнению с сопротивлением реостата, почему его достаточно знать только приблизительно. Этим способом трудно получить малые отклонения, т. к. для этого в цепь нужно ввести очень большое сопротивление.

С. Градуирование посредством сравнения с точным прибором.

a) Сравнение с миллиамперметром. Гальванометр соединяют последовательно с сопротивлением r_2 (фиг. 24) и включают в цепь элемента E параллельно ветви, содержащей миллиамперметр (т.-е. амперметр, градуированный в миллиамперах) и сопротивление r_3; последовательно с этим разветвлением в цепь элемента еще включены сопротивление r_1 и ключ S. Ток в ветвях будет обратно пропорционален их сопротивлениям,— таким образом



Фиг. 24.

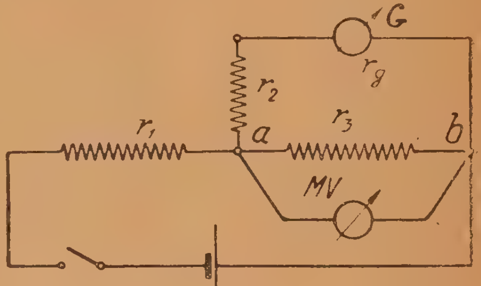
$$\frac{i_g}{i_a} = \frac{r_3 + r_a}{r_2 + r_g},$$

где i_g — сила тока в гальванометре и r_g — его сопротивление, i_a — сила тока в миллиамперметре, r_a — его сопротивление. Отсюда

$$i_g = i_a \cdot \frac{r_3 + r_a}{r_2 + r_g}.$$

Изменяя r_1, можем регулировать силу тока в нужных для градуирования пределах. Изменяя r_3, можем выбрать наиболее удобное и точное (средина шкалы) отклонение стрелки миллиамперметра.

b) Сравнение с милливольтметром. Схема соединения приборов показана на фиг. 25. Разделив разность потенциалов между *a* и *b*, измеренную милливольтметром, на сопротивление $r_2 + r_g$, определим силу тока в гальванометре. Напряжение на зажимах *a* и *b* можем регулировать изменяя r_1 или r_3.



Фиг. 25.

[1]) Хвольсон. Курс физики (4) 103 (1913), Там же даны подробные библиографические указания. Heinke. Handbuch der Elektrotechnik.

3. Измерение сопротивления мостиком Уитстона (Wheatstone)[1]).

Если включить источник тока E вместе с четырьмя сопротивлениями r_1, r_2, r_3, r_4 и гальванометр G согласно схеме фиг. 26, то при замкнутом ключе S будут иметь место отмеченные на схеме токи i и потенциалы V. Теперь отрегулируем сопротивления так, чтобы потенциал V' в c был равен потенциалу V'' в d, в чем можно убедиться по отсутствию отклонения гальванометра, т. к. если $V' - V'' = 0$, то и $i = 0$.

При этом в каждой ветви разность потенциалов должна быть равна произведению силы тока на сопротивление:

$$V_1 - V' = i_1 \cdot r_1 \qquad V_1 - V'' = i_2 \cdot r_2$$

$$V' - V_2 = i_3 \cdot r_3 \qquad V'' - V_2 = i_4 \cdot r_4 \, .$$

Далее $V' = V''$, откуда получаем

$$1. \; i_1 \cdot r_1 = i_2 \cdot r_2 \qquad 2. \; i_3 \cdot r_3 = i_4 \cdot r_4$$

и затем делением 1-го уравнения на 2-е

$$\frac{i_1 \cdot r_1}{i_3 \cdot r_3} = \frac{i_2 \cdot r_2}{i_4 \cdot r_4}$$

А так как $i = 0$, то по первому закону Кирхгофа

$$i_1 = i_3 \qquad \text{и} \qquad i_2 = i_4$$

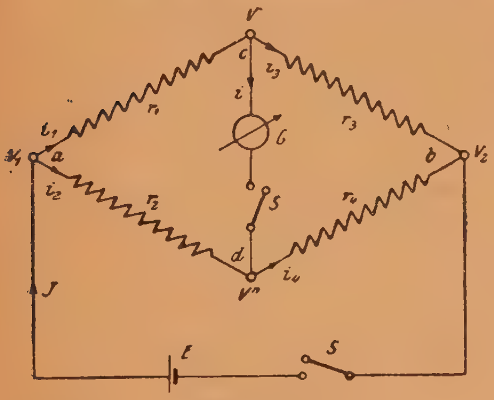
так что $\frac{i_1}{i_3} = 1$ и равным образом $\frac{i_2}{i_4} = 1$.

На основании этого получаем отношение

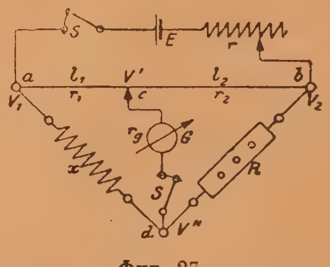
$$\frac{r_1}{r_3} = \frac{r_2}{r_4} \quad \text{или} \quad r_1 \cdot r_4 = r_2 \cdot r_3 \, .$$

Если известны три из этих четырех сопротивлений или отношение двух соседних, то можно вычислить четвертое.

Оба сопротивления r_1 и r_3 можно по Кирхгофу[2]) заменить одной прямолинейной натянутой проволокой с не очень малым собственным сопротивлением и исчезающе малым температурным коэффициентом (фиг. 27).



Фиг. 26.



Фиг. 27.

В этом случае для измерения неизвестного сопротивления x необходимо только одно известное сопротивление R. Точку разветвления c образует подвижной контакт, в форме лезвия („ползушка"); он служит для того, чтобы иметь возможность постепенно и плавно изменять длины l_1 и l_2. Если это нужно, G и E можно поменять местами (при больших x и R).

Если проволока однородна и калибрована, т.-е. по всей длине одинакового сечения и материала, то сопротивление r_1 между ac про-

порционально l_1 и равным образом r_2 между *cb* пропорционально l_2, или

$$r_1 = c \cdot l_1 ; \quad r_2 = c \cdot l_2 .$$

Теперь установим ползушку так, чтобы ток не протекал через гальванометр, тогда будем иметь отношение:

$$\frac{x}{R} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{c \cdot l_1}{c \cdot l_2} \quad \text{или} \quad \frac{X}{R} = \frac{l_1}{l_2} .$$

Наиболее употребительная форма практического выполнения проволочного мостика, это универсальный гальванометр[3]) фирмы Сименс-Гальске. Мостик для малых сопротивлений описан Бём-Раффей (Böhm Raffay)[4]).

При употреблении мостика следует иметь в виду еще следующие детали. В тех случаях, когда сопротивления (фиг. 27) обладают самоиндукцией, даже при точно приравненных сопротивлениях гальванометр покажет отклонение, если ключ S к источнику тока E замыкается после ключа гальванометра. Чтобы избежать этого, сначала замыкают цепь батареи. При размыкании же, наоборот, сначала выключают гальванометр. Для этой цели удобен специальный двойной ключ. Наивыгоднейшие условия для измерения получаются в том случае, когда $r_1 = r_2 = x = R$. Наивыгоднейшее сопротивление гальванометра найдем из формулы

$$r_g = \frac{(r_1 + x) \cdot (r_2 + R)}{r_1 + r_2 + x + R} .$$

Измерение имеет наибольшую точность, если ползушка c стоит на середине проволоки; поэтому следует выбирать R не слишком отличающееся от x.

Чтобы по возможности устранить влияние термоэлектрических сил, следует применять только слабые токи и пропускать их через мостик самое короткое время, или лучше поменять местами гальванометр G и элемент E, однако после такой перестановки нельзя сдвигать ползушку c слишком близко к концам проволоки, чтобы избежать возможного нагревания измерительной проволоки. Далее целесообразно переключать направление тока батареи и из полученных значений брать среднее.

Метод пригоден для измерения сопротивлений от 5 и приблизительно до 10000Ω; при меньших же сопротивлениях нужно вводить поправки на сопротивление соединительных проводов и контактов.

Для отсчета крайне малых углов поворота у зеркальных приборов служит предложенная Прейсом (Preusz)[5]) установка с двойным отражением луча света.

Чтобы определить величину ошибки, сделанной при измерении, передвигают ползушку из положения, при котором предполагается отсутствие тока, в обе стороны до тех пор, пока не получат заметное отклонение стрелки соответственно в ту и другую сторону, а затем вычисляют соответствующие этим положениям сопротивления x_1 и x_2.

Тогда искомое сопротивление будет $x = \frac{x_1 + x_2}{2}$,

а ошибка $\Delta x = \pm \frac{x_1 - x_2}{2}$, и тогда сопротивление выразится в виде $x \pm \Delta x \, \Omega$.

Мостик Уитстона может быть применен в соединении с электрической счетной линейкой Райта (*A. Wright*)[6]) для решения алгебраических уравнений любой степени.

Для точного расчета измерительных мостиков R. Underhill[7]) дал аналитический метод.

---

1) Phil Trans 313 (1843); Pogg Ann. 535 (1844)
2) Pogg. Ann (100) 177.
3) ETZ. 264 (1894); 197 (1897).
4) Sch. ETZ. 314 (1910)
5) ETZ 411 (1905)
6) Bl. f. Post u. Tel. 174 (1909); El. 903 (1909); ETZ. 739 (1910).
7) El. World. 29 (1910).

---

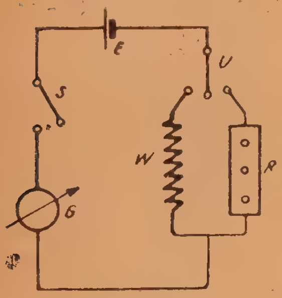
4. Измерение сопротивления по способу замещения.

Необходимое условие для этого измерения, это постоянство электродвижущей силы источника тока.

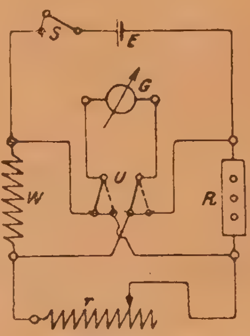
a) Последовательное включение (фиг. 28).

Измеряемое сопротивление *W* включается через переключатель *U* последовательно с гальванометром *G* и источником тока *E*. Эталонное сопротивление *R* присоединяется так, чтобы при переводе переключателя *U* выключалось сопротивление *W* и включалось *R*. Сначала включим сопротивление *W*, получим определенное отклонение гальванометра. Затем, сделав переключение, отрегулируем *R* так, чтобы получить то же отклонение. Тогда сопротивление

$$W = R.$$



Фиг. 28.



Фиг. 29.

В этом случае целесообразно применять гальванометр с малым собственным сопротивлением. Данный метод особенно подходит для измерения больших сопротивлений, например, при испытании изоляции, как это указано в § 17.

b) Параллельное включение (фиг. 29).

При измерении по этому способу сопротивления *W* и *R* включаются последовательно с регулируемым сопротивлением r_1, а гальванометр с возможно большим собственным сопротивлением включается попеременно параллельно *W* или *R*. Если гальванометр дает одинаковые отклонения при обоих положениях переключателя *U*, то

$$W = R.$$

---

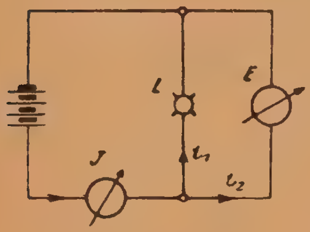
5. Определение сопротивления измерением тока и напряжения.

(Закон Ома).

Этот метод следует применять в тех случаях, когда на величину сопротивления влияет, вследствие нагревания, сила тока, например для якорей динамо, катушек магнитов и трансформаторов, горящих ламп накаливания и т. п. При этом измеряемый ток может одновременно служить для нагревания.

Закон Ома $E = J \cdot R$

можно выразить в словесной форме так: чтобы пропустить ток J через сопротивление R, нужно приложить к концам R напряжение E, величина которого равна произведению $J.R$. Иначе можно выразить это так: если в сопротивлении R протекает ток J, то на концах этого сопротивления имеет место падение напряжения E^n как произведение $J \cdot R$. Теперь если известны две из величин уравнения, в данном случае E и J, то по ним можно вычислить и сопротивление R.



Фиг. 30.

При практическом осуществлении возможны две схемы включения, и однако обе не дают возможности определить сопротивление без поправок. Если мы включим амперметр J в цепь по схеме фиг. 30, так что он измерит ток $J = i_1 + i_2$, т.-е. сумму токов i_1 в лампе L и i_2 в вольтметре E то частное $\frac{E}{J}$ даст нам общее сопротивление лампы и вольтметра, а сопротивление одной лампы будет

$$R = \frac{E}{i_1} = \frac{E}{J - i_2}.$$

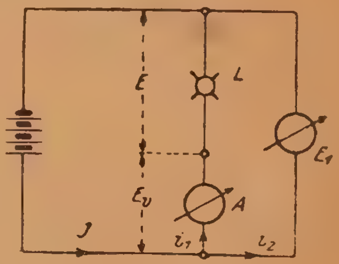
Поэтому из показания амперметра нужно вычесть силу тока i_2 в вольтметре. Она будет $i_2 = \frac{E}{R_v}$, где R_v обозначает сопротивление вольтметра. В результате

$$R = \frac{E \cdot R_v}{J \cdot R_v - E}.$$

Если же наоборот (фиг. 31) будем пропускать через амперметр A только ток в лампе i_1, то из показаний приборов получим

$$\frac{E_1}{i_1} = \frac{E}{i_1} + \frac{E_a}{i_1} = R + r$$

сумму сопротивлений лампы R и амперметра r; в этом случае из полученного результата нужно вычесть r—сопротивление амперметра A.



Фиг. 31.

Рассмотрев обе схемы включения, видим, что поправки могут отпасть, если при первой схеме (фиг. 30) искомое сопротивление R очень мало по сравнению с сопротивлением вольтметра, и потому i_2 можно пренебречь по сравнению с i_1. Второе включение (фиг. 31) применяют в том случае, когда измеряемое сопротивление R так велико, что сопротивление амперметра по сравнению с ним исчезающе мало (приблизительно $< 2^0/_{00}$).

Если для измерения применить статический прибор, многокамерный электрометр, построенный на принципе электростатического притяжения или отталкивания проводников, заряженных статическим электричеством, то не требуется поправок (при схеме фиг. 31), т. к. цепь вольтметра в этом случае не берет тока из цепи.

При измерении сопротивлений обмоток магнитов шунтовых машин следует выключать вольтметр до размыкания цепи возбуждения.

Пример: Нужно измерить сопротивление R лампы накаливания в зависимости от силы тока J, появляющейся при различных напряжениях E.

a) Включение: Т. к. сопротивление лампы очень велико, то лампу следует соединить с амперметром A и вольтметром E по схеме фиг. 31 и приключить к источнику тока. Напряжение на клеммах лампы изменяем с помощью дополнительного сопротивления или делителя напряжения (см. фиг. 142).

b) Измерение: Была исследована лампа накаливания с угольною нитью, изготовленная для работы при $E = 220$ вольт; $J = 0{,}23$ амп. Амперметр выбран с собственным сопротивлением 1Ω на силу тока 0,15 амп., со шкалой $S_i = 150$ делений или с ценой деления $c_i = 10^{-3}$ амп. Для расширения вдвое шкалы амперметра, до 0,30 амп., параллельно ему включено сопротивление в 1Ω, так что постоянная $c_i = \frac{J}{S_i} = 2 \cdot 10^{-3}$ амп. (деление шкалы). На приборе отсчитывают деления шкалы и получают $J = c_i \cdot S_i$ амп.

Таким путем для лампы получены приведенные в таблице отсчеты S_i и E и вычислено J.

S_i шкала	E вольт	J амп.	S_i шкала	E вольт	J амп.
0	0	0	65,5	148	0, 31
5	14	0,010	81	173	0,162
10	26	0,020	90	187	0,180
15,5	40	0,031	100	199	0,200
24	58	0,048	114,5	217	0,229
34	82	0,068	124	227	0,248
44	107	0,088	139	240	0,278
53	124	0,106			
Наблюдено		Вычисл.	Наблюдено		Вычисл.

c) Обработка результатов: Согласно фиг. 32 токи J откладывают как абсциссы, напряжения E как ординаты и по найденным точкам строят непрерывную кривую $f(E \cdot J)$, так чтобы она прошла через возможно большее число точек или очень близко от них. Таким путем сразу узнают и уменьшают вошедшие в таблицу ошибки наблюдений. По „выравненным" значениям E и соответствующим J находят подсчетом сопротивления $R = \frac{E}{J}$.

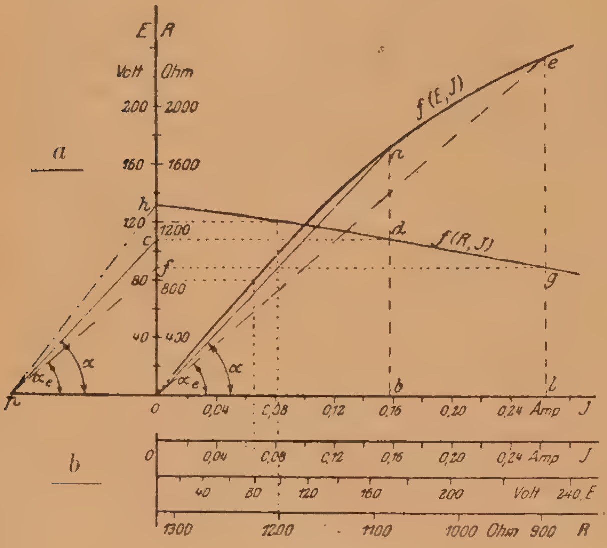
Однако R можно определить и графически:

Проведем, например, из точки a луч oa, образующий с осью абсцисс $\sphericalangle\alpha$, тогда

$$tg\alpha = \frac{ab}{ob} = c \cdot \frac{E}{J} = c \cdot R\ .$$

Чтобы избежать определения масштаба c подсчитывают по взятым значениям ($E=170\ V$, $J=0{,}158\ A$) сопротивление R (1078 Ω) и откладывают его в подходящем масштабе на ab,— отрезок bd. Затем через d проводят к оси абсцисс параллель dc и через c проводят cp параллельно oa, так что $\sphericalangle cpo = \sphericalangle\alpha$. После чего точкой p пользуются, как полюсом для определения сопротивлений, соответствующих всем остальным точкам кривой $f\ (E,J)$.

Произведем построение, например, для точки e; для этого через p проведем прямую pf параллельную oe, тогда получим $\triangle pof \backsim \triangle ole$; сопротивление R выражается через $tg\sphericalangle eol = tg\sphericalangle fpo = tg\alpha_e$, почему of и будет мерою для этого сопротивления. Если оставляем постоянным po, то лучи из p будут отрезать на оси ординат сопротивления R в масштабе, принятом нами при первом подсчете значения bd. Например, сопротивление of отвечает точке e. Проведем через f в g прямую, параллельную оси абсцисс, тогда gl и будет искомой величиной R. Таким же образом определяют для большого числа точек кривой $f\ (E,\ J)$ соответствующие им точки сопротивлений. По этим последним строят непрерывную кривую $f\ (R,J)$, которая и выразит собой искомую зависимость сопротивления R от силы тока J.



Фиг. 32.

Для начальной точки $E=0, J=0$, таблица дает неопределенное значение $R=\frac{0}{0}$. В этом случае графическое построение может помочь делу. Нужно только в точке 0 построить касательную к кривой $f\ (E,J)$, а через точку p провести луч ph, параллельный этой касательной, тогда oh и будет искомое сопротивление лампы при силе тока равной нулю.

Если желают иметь возможность легко и быстро определять зависимость R не только от J, но и от E, то для этого наносят три поименованные величины в виде шкалы.

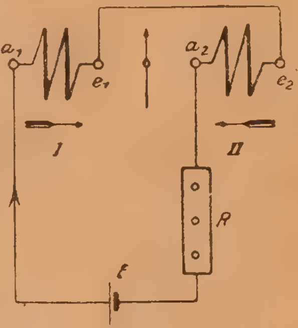
Для этой цели проводят на фиг. 32_b для каждой из величин одну прямую линию. Сначала переносят с фиг 32_a деления для силы тока J. Чтобы подразделить прямую для напряжения E, берут определенное значение E на оси ординат и ведут от него горизонтальную прямую до пересечения с кривой $f\ (E,J)$ и из точки пересечения опускают перпендикуляр на линию E фиг. 32_b. Точку полученную таким путем обозначают тем же значением, от которого исходили

на оси ординат (напр. 80 вольт). Таким же образом строят шкалу для сопротивления R, пользуясь для этого кривой $f(R,J)$ (напр. $R = 1200\ \Omega$).

d) заключительные выводы: Кривая сопротивления угольной нити идет вниз с увеличением силы тока и соответственно температуры. Из этого следует, что температурный коэффициент отрицателен. Если определить температуру, соответствующую двум значениям R, то можно было бы вычислить температурный коэффициент (сравнить § 24).

6. Измерение сопротивления дифференциальным гальванометром.

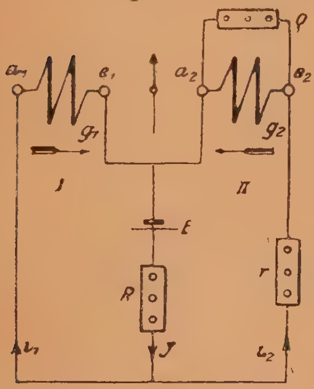
Дифференциальный гальванометр имеет две взаимно параллельные катушки. Обе эти катушки действуют на подвешенную между ними магнитную стрелку „иглу“. Целесообразно намотать бифилярно каждую из катушек так, чтобы она состояла из двух отдельных совершенно однородных катушек; переключив катушки соответствующим образом, можно изменить свойства гальванометра. Кроме того, при такой конструкции при включении навстречу, полностью уничтожится электромагнитное действие, а таким образом и отклонения стрелки. Если ток протекает через катушки так, что вращающие моменты иглы, вызываемые катушками, равны и прямопротивоположны, то гальванометр покажет отсутствие отклонения. Клеммы четырех концов катушек обозначаются обыкновенно a_1 (*Anfang* — начало), e_1 (*Ende* — конец), a_2 и e_2.



Фиг. 33.

Дифференциальный гальванометр, пригодный для измерения сопротивления, должен удовлетворять следующим условиям:

1. Обе катушки должны вызывать вполне одинаковый, направленный в противоположные стороны вращающий момент иглы.



Фиг. 34.

2. Сопротивления катушек должны быть равны или должно быть известно отношение этих сопротивлений.

3. У гальванометров с подвижным магнитом (магнитной стрелкой) катушки должны быть установлены в плоскости меридиана.

Чтобы установить выполнено ли 1-ое условие, пользуются включением по схеме фиг. 33. Включенные навстречу катушки I и II присоединяют, последовательно с балластным сопротивлением R, к зажимам элемента E. Во время опыта балластное сопротивление постепенно уменьшают. При этом через катушку II ток протекает в направлении противоположном тому, в котором он же протекает через I, благодаря этому на магнитную иглу воздействует только разность вращающих моментов. В большинстве случаев эта разность не будет равна нулю, но ее можно привести к нулю, передвинув в осевом направлении одну из катушек. Следовательно при этом включении нужно добиться, чтобы стрелка прибора стояла на нуле. Если катушки неподвижны, то все же отклонение можно устранить, для

чего надо только включить параллельно более сильной катушке большое сопротивление ρ (фиг. 34).

Затем, чтобы испытать равны ли сопротивления катушек (2-ое условие), их включают по схеме фиг. 34.

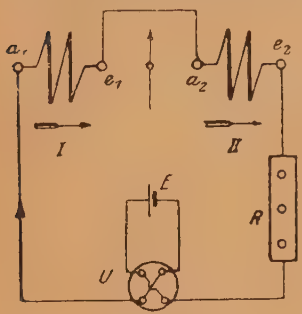
При таком соединении получаем отношения

$$i_1 = \frac{E - J \cdot R}{g_1} \text{ и } i_2 = \frac{E - J \cdot R}{g_2},$$

где g_1 и g_2 обозначают сопротивления катушек (в комбинации с шунтом, если он включен). Если стрелка не отклоняется, то по условию I, токи в катушках равны, таким образом

$$i_1 = i_2 .$$

Тогда также и $g_1 = g_2$. Если же имеется отклонение, то его устраняют, включив дополнительное сопротивление r.



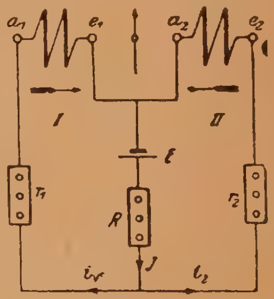
Фиг. 35.

Чтобы установить, выполнено ли 3-ье условие, пользуются соединением по схеме фиг. 35.

Катушки I и II соединяют последовательно, последовательно же с ними включают балластное сопротивление R и через двухполюсный переключатель присоединяют к зажимам элемента E. Катушки соединены так, что при прохождении тока их силовые действия складываются. Если при переводе переключателя U отклонения в обе стороны равны, то катушки стоят правильно, в противном случае гальванометр нужно постепенно поворачивать вокруг оси, пока не наступит равенство отклонений.

Таким путем инструмент правильно устанавливается для измерения сопротивлений.

Если катушки имеют существенно различную обмотку, то удобнее работать, определив о т н о ш е н и е сопротивлений обоих катушек. Чтобы выполнить это условие пользуются схемой фиг. 36.



Фиг. 36.

В этом случае вызываемые катушками вращающие моменты стрелки направлены в противоположные стороны. Если имеет место отклонение, то его устраняют, передвигая одну из катушек. Вращающий момент первой катушки

$$M_{d1} = c_1 \cdot i_1 ,$$

где коэффициент пропорциональности c_1 зависит от индукции магнитной стрелки, размеров и числа витков катушки. Таким же образом для второй катушки

$$M_{d2} = c_2 \cdot i_2 ,$$

и в нашем случае

$$M_{d1} = M_{d2} \text{ и } c_1 \cdot i_1 = c_2 \cdot i_2$$

или

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{c_2}{c_1} = c .$$

Но по второму закону Кирхгофа имеем отношение

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{g_2}{g_1} ,$$

где g_1 и g_2 обозначают сопротивления катушек гальванометра (включая шунт), на основании чего

$$\text{I.} \quad \frac{g_2}{g_1} = c.$$

Если теперь включить в каждую ветвь по известному сопротивлению r_1 и r_2, при чем отрегулировать их так, чтобы стрелка не отклонялась, то получим токи i'_1 и i'_2, для которых действительно отношение

$$\text{II.} \quad \left[\frac{i'_1}{i'_2}\right] = c = \frac{g_2 + r_2}{g_1 + r_1}.$$

Уравнение II в преобразованном виде дает

$$c \cdot g_1 + c \cdot r_1 = g_2 + r_2 .$$

А так как из уравнения I

$$c \cdot g_1 = g_2 ,$$

то g_2 в правой половине сокращается и остается

$$c \cdot r_1 = r_2$$

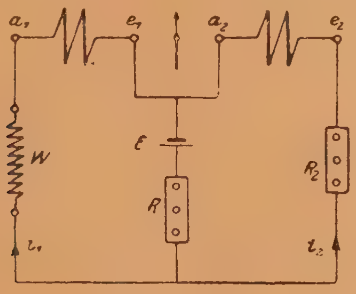
или

$$c = \frac{r_2}{r_1} ,$$

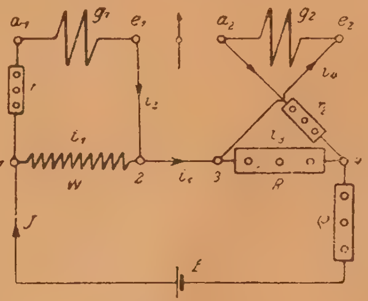
т.-е. постоянное отношение сопротивлений $c = \frac{g_2}{g_1}$ можно определить непосредственно с помощью двух известных сопротивлений r_2 и r_1.

а) Последовательное включение.

Установив и выверив прибор вышеописанным образом, его включают по схеме фиг. 37, предложенной Бекерелем (Becquerel) (1826).



Фиг. 37.



Фиг. 38.

В этой схеме сопротивление r_1 заменено измеряемым сопротивлением W. Чтобы устранить появившееся отклонение стрелки, регулируют в другой ветви известное сопротивление R_2. Согласно ранее доказанному, получим отношение

$$\frac{g_2 + R_2}{g_1 + W} = c$$

или

$$\frac{R_2}{W} = c .$$

А так как $c = \frac{r_2}{r_1}$ определено предварительным опытом, то можем вычислить и

$$W = R_2 \cdot \frac{r_1}{r_2}.$$

В частном случае при $c = 1$ будем иметь $\frac{r_2}{r_1} = 1$ и отсюда

$$W = R_2.$$

Если при опыте не удается устранить отклонение благодаря слишком малой величине R_2, то меняют местами W и R_2; в этом случае нужно будет пользоваться обратной величиной постоянной c; следовательно:

$$W = R_2 \cdot \frac{r_2}{r_1}.$$

Этот метод удобен для измерения больших сопротивлений. Он тем чувствительнее, чем меньше сопротивление гальванометра по отношению к неизвестному сопротивлению, так как в этом случае изменения силы тока в ветвях будут зависеть только от сопротивлений W и R_2, маленькими же сопротивлениями катушек, включенными последовательно, можно будет пренебречь. Если нельзя достаточно тонко отрегулировать R_2, так чтобы стрелка гальванометра стояла точно на нуле, то искомое значение R_2 находят интерполяцией. Например, пусть при сопротивлении R_1 получено отклонение α_1 и при R_3 — α_3, тогда положению покоя стрелки — α_2 будет соответствовать сопротивление:

$$R_2 = R_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot \frac{R_3 - R_1}{\alpha_3 - \alpha_1}.$$

b) Параллельное включение.

α) Простое параллельное подключение [1]).

Схема этого включения дана на фиг. 38. Измеряемое сопротивление W, известное R и балластное сопротивление ρ включаются последовательно в цепь источника тока E. Во время опыта, по мере уточнения регулировки R, балластное сопротивление ρ постепенно выключают. Концы катушек гальванометра присоединяют к точкам $1 \div 4$ так, чтобы катушки действовали на стрелку в противоположные стороны. Если $g_1 = g_2$, т.-е. постоянная $c = 1$, то отклонение стрелки исчезнет при $W = R$. Однако это измерение можно произвести и при $W \gtrless R$. Для этого в обе ветви катушек включают по реостату и, регулируя последние, приводят отклонение к нулю. Пусть при этом в ветвь I введено сопротивление r, а в ветви II — $r_2 = 0$, тогда получаем следующие соотношения:

1. $J = i_1 + i_2 = i_3 + i_4$
2. $i_1 \cdot W = i_2 \cdot (r + g_1)$
3. $i_3 \cdot R = i_4 \cdot g_2$.

Раз гальванометр не дает отклонения, значит выполнено условие равенства вращающих моментов, а следовательно и токов в обоих катушках,— поэтому добавим к вышеприведенным еще равенство

$$4. \qquad i_2 = i_4 \,.$$

Из уравнения 1 и 4 кроме того следует

$$5. \qquad i_1 = i_3 \,.$$

Разделив уравнение 2-ое на 3-ье, получим

$$\text{I.} \qquad \frac{W}{R} = \frac{r + g_1}{g_2} \,,$$

т. к. токи сокращаются на основании уравнения 4 и 5.

Теперь, если мы включим в ветвь I еще сопротивление r_1, а в ветвь II r_2 и регулируя эти сопротивления приведем отклонение опять к нулю, то токи i изменятся на i' и мы получим

$$6. \qquad i'_1 \cdot W = i'_2 \cdot (r + r_1 + g_1)$$

$$7. \qquad i'_3 \cdot R = i'_4 \cdot (g_2 + r_2) \,.$$

Отсюда посредством деления получим

$$\text{II} \qquad \frac{W}{R} = \frac{r + r_1 + g_1}{g_2 + r_2} = \frac{(g_1 + r) \cdot \left(1 + \dfrac{r_1}{g_1 + r}\right)}{g_2 \cdot \left(1 + \dfrac{r_2}{g_2}\right)} \,.$$

Подставив из уравнения I

$$g_1 + r = g_2 \cdot \frac{W}{R}$$

в уравнение II мы получим:

$$\frac{W}{R} = \frac{g_2 \cdot \dfrac{W}{R}\left(1 + \dfrac{r_1}{g_1 + r}\right)}{g_2 \cdot \left(1 + \dfrac{r_2}{g_2}\right)} \,.$$

После сокращения на $\frac{W}{R}$ и g_2 остается

$$1 + \frac{r_1}{g_1 + r} = 1 + \frac{r_2}{g_2}$$

или

$$\frac{r_1}{g_1 + r} = \frac{r_2}{g_2} \,,$$

откуда следует

$$\frac{g_1 + r}{g_2} = \frac{r_1}{r_2} \,.$$

Подставляя из ур. I вместо левой части $\frac{W}{R}$, имеем.

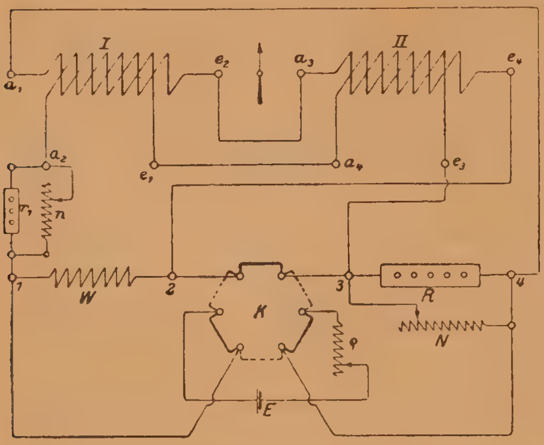
$$\frac{\mathbf{W}}{\mathbf{R}} = \frac{\mathbf{r_1}}{\mathbf{r_2}} \,.$$

Отсюда мы видим, что условие равенства сопротивлений катушек и проводов может быть не выполнено, так как эти величины не входят в формулу.

Однако на чувствительность этого измерения может повлиять сопротивление контактов; поэтому для большей точности нужно брать катушки гальванометра с возможно большим сопротивлением.

β) Перекрывающее параллельное подключение [2]).

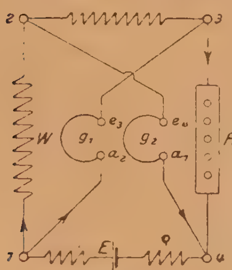
Названный метод дает возможность измерять малые сопротивления, при чем он устраняет влияние сопротивления контактов на результаты измерения. В *P. T. R.* *) этот метод применяется для точного измерения сопротивлений, например, эталонных сопротивлений с разделенными проводами тока и напряжения или ртутных эталонов с относительно большим сопротивлением подводящих проводов.



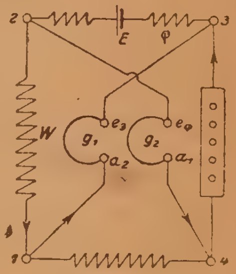
Фиг. 39.

При сопротивлениях одного порядка пользуются по Егеру (Jäger)[3]), схемой фиг. 39.

Каждые две частичные катушки включены навстречу и присоединены свободными концами к клеммам 1, 2, 3, 4. По сравнению со схемой фиг. 38 в этом случае только переменены местами соединения в точках 2 и 3. *K* — коммутатор с шестью чашками, он снабжен тремя дужками, вращающимися вокруг оси; этот коммутатор служит для того, чтобы производить непосредственно одно за другим наблюдения при обоих схемах включения системы (начерченной и обозначенной пунктиром). Вместо коммутатора можно пользоваться трехполюсным переключателем. При обоих положениях коммутатора получаем распределение токов показанное на фиг. 40 и 41. При переключении направление тока в *W* и *R* изменяется. Если теперь не выполнено условие I, например, система катушек $a_2 \div e_3$ сильнее, то в эту ветвь включают регулируемое дополнительное сопротивление r_1 и параллельно ему сопротивление *n*. Для точного регулирования параллельно *R* включают известное большое сопротивление *N*. При этом изменение *N* при переключении коммутатора вызовет отклонение гальванометра той же величины но противоположного направления, напротив изменение шунта *n* вызовет отклонение той же величины и направления. При такой установке нет надобности заранее добиваться одинакового действия тока в катушках и одинакового сопротивления их систем, нужно только выбрать подходящие *N* и *n*,



Фиг. 40.



Фиг. 41.

*) Германский физико-технический государственный Институт (Physikalisch Technische Reichsanstalt).

чтобы при измерении гальванометр не дал отклонения или показал бы отклонения одинаковой величины и направления.

В этом случае

$$W = \frac{R \cdot N}{R + N}.$$

Если же не удается получить одинаковые отклонения в одном и том же направлении, то точно определяют средние отклонения в противоположных направлениях α_1 и α_2, соответствующие сопротивлениям N_1 и N_2. Затем с помощью интерполяции определяют истинное значение сопротивления. Интерполировать при этом можно в пределах $1/N_1$ и $1/N_2$ [4]).

Измерение обладает наибольшей чувствительностью, когда сопротивления катушек гальванометра $g = W$. При малой величине сопротивления W это условие трудно выполнить.

На измерение влияет несовершенство изоляции гальванометра, поэтому сопротивление изоляции должно быть очень большим. Бифилярная обмотка катушек имеет при этом то преимущество, что позволяет легко определить сопротивление изоляции между клеммами.

Хаусрат (Hausrath) [5]) расширил сферу применения этого метода, предложив употреблять для сравнения неравных сопротивлений так называемое „двойное выравнивание“.

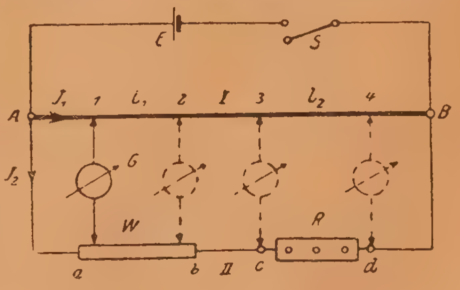
Измерения с помощью дифференциального гальванометра имеют то преимущество, что при них нет необходимости в постоянном напряжении источника тока.

1) Wied. Ann. (13) 411 (1876).
2) Wied Ann. 76 (1883).
3) ZfJ. 288 (1904).
4) Jäger. Wiss Abh. d. PTR. 425 (1895). ZfJ. 37 (1903).
5) Ann. d. Phys. 134 (1905) — Samml. el. Vortr. (7) 12: Дифференциальный метод сравнения малых сопротивлений.

7. Измерение малых сопротивлений

Матиссен и Хокин (Matthiessen и Hockin).

При измерении малых сопротивлений мостиком Уитстона влияние сопротивления соединений может совершенно исказить результат. Следующий метод свободен от этого влияния. Схему включения дает фиг. 42.



Фиг. 42.

Здесь неизвестное сопротивление W и известное R включены последовательно между собой и параллельно измерительной проволоке $A \div B$. Все это соединение приключено к источнику тока E. Предположим, что потенциал в A (+) выше чем в B (—), эта разность потенциалов будет выравниваться токами J_1 и J_2 в ветвях I и II. Если точка a на сопротивлении W обладает потенциалом V_1, то и на измерительной проволоке должна быть точка с тем же потенциалом. Пусть это будет точка 1. Чтобы найти ее, возьмем гальванометр G и присоединим его зажимы к двум подвижным контактам; затем

поместим один такой контакт в a, другой же будем передвигать по измерительной проволоке $A \div B$ до тех пор пока гальванометр не покажет отсутствие отклонения. Раз в гальванометре нет тока, то значит он включен между точками равного потенциала. Таким же способом мы определим точки 2, 3, 4, соответствующие точкам b, c, d.

Пусть найденные точки обладают потенциалами $V_1 \div V_4$, тогда можем составить следующие отношения:

$$V_1 - V_2 = J_1 \cdot l_1 = J_2 \cdot W$$

$$V_3 - V_4 = J_1 \cdot l_2 = J_2 \cdot R,$$

при чем l_1 и l_2 обозначают сопротивления между точками 1 и 2 и соответственно 3 и 4. Делением обоих уравнений получим

$$\frac{W}{R} = \frac{l_1}{l_2} \text{ или } W = \frac{l_1}{l_2} \cdot R$$

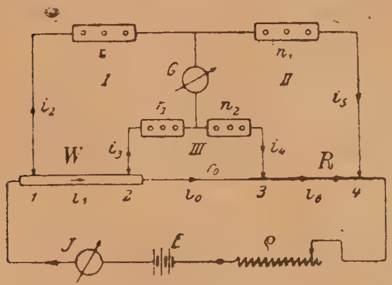
Далее можно предположить, что проволока однородна и калибрована, т.-е. во всех точках одинакового сечения, тогда измерение упростится тем, что отношение сопротивлений $\frac{l_1}{l_2}$ можно будет заменить отношением длины проволоки между данными точками. Этот метод очень точен, однако при измерении удельных сопротивлений он требует большого числа одновременных манипуляций и наблюдений, поэтому он мало пригоден как для повседневной практики, так и для быстрого сравнения сопротивлений между собой.

---

8. Измерение малых сопротивлений двойным мостиком Томсона.

В практике пользуются различными конструкциями двойного мостика [1]), но все они построены по схеме фиг. 43.

Измеряемое сопротивление $W = 1 \div 2$ включается последовательно с измерительной проволокой $R = 3 \div 4$, батареей E, амперметром J и регулируемым сопротивлением ρ. Четыре подвижные контакта $1 \div 4$ соединены между собою в две ветви сопротивлениями r и n, между этими ветвями включен гальванометр G. Сопротивления n в большинстве случаев выбирают в несколько раз большими по величине чем r, так что между ними имеет место отношение



Фиг. 43.

$$n = c \cdot r \text{ откуда } \frac{n_1}{n_2} = \frac{c \cdot r_1}{c \cdot r_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

при чем употребительная величина для $c = 10$ или 100. Контакты 1, 2, 3, 4 передвигают до тех пор, пока не добьются отсутствия тока в гальванометре $i = 0$.

Для этого нужно, чтобы были равны между собой разности потенциалов в ветви I между точкой 1 и обоими клеммами гальванометра. То же самое условие должно быть выполнено и в ветви II между клеммами гальванометра и точкой 4. Отсюда получаем два уравнения

$$1. \quad i_1 \cdot W + i_3 \cdot r_2 = i_2 \cdot r_1$$

$$2. \quad i_6 \cdot R + i_4 \cdot n_2 = i_5 \cdot n_1.$$

Делением обоих выражений на их правые половины получим:

$$3.\qquad \frac{i_1 \cdot W}{i_2 \cdot r_1} + \frac{i_3 \cdot r_2}{i_2 \cdot r_1} = 1$$

$$4.\qquad \frac{i_6 \cdot R}{i_5 \cdot n_1} + \frac{i_4 \cdot n_2}{i_5 \cdot n_1} = 1$$

или

$$5.\qquad \frac{i_1}{i_2} \cdot \frac{W}{r_1} = 1 - \frac{i_3}{i_2} \cdot \frac{r_2}{r_1}$$

$$6.\qquad \frac{i_6}{i_5} \cdot \frac{R}{n_1} = 1 - \frac{i_4}{i_5} \cdot \frac{n_2}{n_1}\ .$$

А так как $i_1 = i_6$, $i_2 = i_5$ и $i_3 = i_4$ или $\frac{i_3}{i_2} = \frac{i_4}{i_5}$ и согласно основному предположению $\frac{r_2}{r_1} = \frac{n_2}{n_1}$, то правые части 5 и 6 равны между собой, из чего следует:

$$\frac{i_1}{i_2} \cdot \frac{W}{r_1} = \frac{i_6}{i_5} \cdot \frac{R}{n_1}\ .$$

Далее
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{i_6}{i_5}$$

так что конечный результат будет

$$\mathbf{\frac{W}{R} = \frac{r_1}{n_1} = \frac{1}{c}}\ .$$

Если принять $r_1 = r_2$ и $n_1 = n_2$, то доказательство можно вывести проще. Тогда

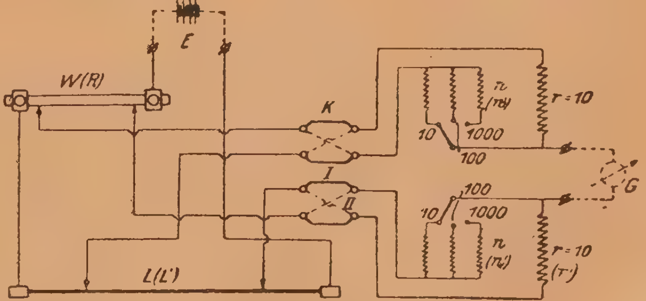
$$i_1 \cdot W = (i_2 - i_3) \cdot r$$

$$i_6 \cdot R = (i_5 - i_4) \cdot n$$

или после деления

$$\mathbf{\frac{W}{R} = \frac{r}{n}}\ .$$

Итак, на основании всего изложенного, мы получили, что сопротивления соединительных проводов не оказывают никакого влияния на измерение и равным образом можно пренебречь сопротивлениями контактов по сравнению с r и n, если последние не слишком малы (обычно r и n не меньше 10 Ω). r_0 должно быть возможно меньше для того, чтобы падение потенциала происходило главным образом на W и R и небольшое передвижение движков или изменение $R_д$ заметным образом изменяло распределение токов и могло бы быть учтено.



Фиг. 44.

Мостик, построенный по этому принципу, для практического употребления снабжен кроме того, как видно из схемы фиг. 44, приспособлением для взаимной перестановки сопротивлений R и W, это приспособление состоит из переключателя K, через который проходят проводники, соединяющие r и n с ползушками $1 \div 4$. Этим переключателем можно установить или соединение I, начерченное сплошными линиями или II, начерченное пунктиром. Такое приспособление дает то преимущество, что позволяет употреблять неградуированную измерительную проволоку. Пусть при положении I коммутатора и отсутствии тока в гальванометре сопротивлению W соответствует сопротивление отрезка измерительной проволоки длиной L, эту длину можно отсчитать на масштабе под проволокой, тогда имеет место отношение

$$\text{I.} \qquad \frac{W}{L}=\frac{r}{n},$$

так как по большей части берут

$$r_1=r_2=r \quad \text{и} \quad n_1=n_2=n .$$

В большинстве случаев W меньше сопротивления измерительной проволоки L, почему и r должно быть меньше n. Если заменить сопротивление W известным сопротивлением R, то можно проградуировать измерительную проволоку. Но для того чтобы влияние переходных сопротивлений было исчезающе малым, нужно выбирать не слишком малое R (от 4 до 8 Ω). Если в этом случае сопротивление R больше сопротивления измерительной проволоки, то большее сопротивление должно быть в схеме включено на стороне n, а коммутатор установлен в положении II.

Если ток в ветви гальванометра исчезнет при сопротивлениях r' и n' и при длине L' между контактами измерительной проволоки, то имеет место отношение

$$\text{II.} \qquad \frac{R}{L'}=\frac{n'}{r'} .$$

Из уравнения I и II получим посредством деления

$$\frac{W \cdot L'}{L \cdot R}=\frac{r \cdot r'}{n \cdot n'},$$

$$\text{или} \qquad W=R \cdot \frac{L}{L'} \cdot \frac{r \cdot r'}{n \cdot n'} .$$

При чем сюда входит только отношение $\frac{L}{L'}$, которое можем определить по отмеренным длинам проволоки, так как эта проволока берется однородная и калиброванная.

Пока измеряемое сопротивление W (фиг. 43) не меньше 0,01 Ω, небольшая неточность сопротивлений r_2 и n_2 не оказывает заметного влияния на результат, при условии, что r_0 остается малым.

Если $\frac{r_1}{n_1} \gtrless \frac{r_2}{n_2}$, то при измерении сопротивлений меньше 0,001 Ω, с точностью до 10^{-6} их величины, нужно ввести поправку для случая $r_0 > 0{,}001\,\Omega$. Эта поправка может быть получена при отсутствии тока в гальванометре на основании точной формулы:

$$\frac{W}{R}-\frac{r_1}{n_1}+\frac{r_0}{R} \cdot \frac{n_2}{r_2+n_2+r_0} \cdot \left(\frac{r_2}{n_2}-\frac{r_1}{n_1}\right)=0 .$$

А так как r_0 можно пренебречь по сравнению с r_2+n_2, то поправочный член можно также написать в виде

$$k=\frac{r_0}{R}\cdot\frac{1}{\frac{r_2}{n_2}+1}\cdot\left(\frac{r_2}{n_2}-\frac{r_1}{n_1}\right).$$

Отдельные значения k можно определить измерением; например по методу 2 или 15 (замещения или прямого отсчета), пользуясь для сравнения сопротивлением приблизительно того же порядка (10^{-3} до $10^{-4}\ \Omega$); тогда вычислив k получим

$$\frac{W}{R}=\frac{r_1}{n_1}-k.$$

Этот метод применяется в *PTR* для сравнения присылаемых фирмами сопротивлений, а также для проверки употребляемых при этом эталонов [2]).

Обстоятельные опыты с применением мостика Томсона для точных измерений выполнены Егером, Линдеком (Lindeck) и Диссельгорстом (Diesselhorst) [3]).

Мостик Томсона можно применять и для измерений при переменном токе.

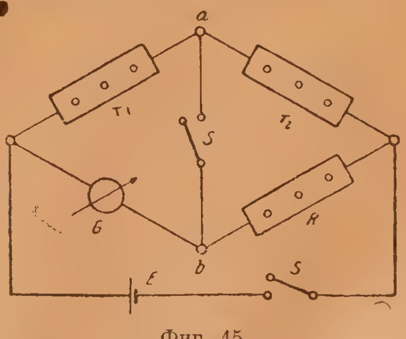
Так, Шеринг (Schering) [4]) и Дегинь (Deguisne) [5]) указывают способ определения фазового угла малых сопротивлений этим мостиком, с помощью вибрационного гальванометра.

1) W. Thomson Phil. Mag. 149 (1862).
2) Примеры этого см. ZfJ 66 (1903).
3) ZfJ. 33 (1903).
4) ETZ. 421 (1917).
5) AfE. 375 (1917).

9. Сопротивление гальванометра в мостике.

(Томсон).

Гальванометр G включают на место неизвестного сопротивления (фиг. 45), в ветви же $a \div b$ оставляют только ключ S. Включенный таким образом гальванометр покажет некоторое отклонение. Регулируя сопротивления r_1, r_2, и R добиваются того, чтобы при замыкании и размыкании ключа отклонение гальванометра оставалось неизменным, в этом случае в диагональной ветви мостика нет тока, что дает уравнение



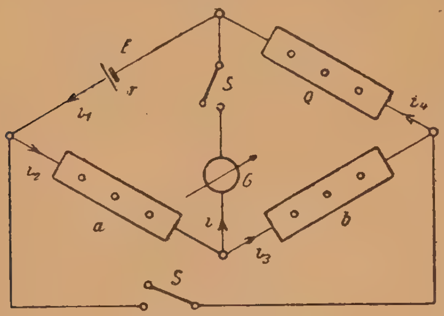
Фиг. 45.

$$\frac{r_1}{r_2}=\frac{G}{R} \qquad \text{или} \qquad G=R\cdot\frac{r_1}{r_2}.$$

10. Сопротивление элементов.

(Манс — Mance).

Измерить вообще сопротивление элемента трудно, так как это сопротивление изменяется в зависимости от силы тока отдаваемой элементом. Вышеназванный метод позволяет однако провести без затруднений это измерение. Для этой цели элемент E, с внутренним сопротивлением r, замыкают в цепь тока с тремя известными сопротивлениями a, b, c (фиг. 46).



Фиг. 46.

В диагональную ветвь включают гальванометр G с большим собственным сопротивлением и ключ S. При замыкании этой ветви мостика гальванометр покажет отклонение, вследствие протекания тока через эту ветвь. Если отклонение не меняется при замыкании и размыкании нижнего ключа S, то имеет место отношение

$$\frac{r}{c} = \frac{a}{b} \quad \text{или} \quad r = \frac{a \cdot c}{b} .$$

Обозначив токи в отдельных ветвях через $i_1 \div i_4$ и i, получим по второму закону Кирхгофа для замкнутого контура с сопротивлениями r, G, a уравнение:

$$\text{a)} \qquad E = i_1 \cdot r + i \cdot G + i_2 \cdot a \; ,$$

для цепи с сопротивлениями c, b, G:

$$\text{b)} \qquad i \cdot G = i_4 \cdot c + i_3 \cdot b$$

при разомкнутом ключе S в замыкающей внешней ветви.

Если же ключ S во внешней ветви замкнут, то токи изменяются на $i'_1 \div i'_4$ и соответственно i', при чем получаем отношения

$$\text{c)} \qquad E = i'_1 \cdot r + i' \cdot G + i_2' \cdot a$$

$$\text{d)} \qquad i' . G = i'_4 . c + i'_3 . b \; .$$

Если ток в одной диагональной ветви не влияет на ток в другой; то в этом случае $i = i'$, т. е. гальванометр не меняет отклонение при замыкании и размыкании ключа S во внешней ветви. В этом особом случае при $i = i'$ мы получаем, приравнивая правые части уравнений *a)* и *c)* и соответственно *b)* и *d)*

$$i_1 \cdot r + i_2 \cdot a = i'_1 \cdot r + i'_2 \cdot a$$

или $$\text{I.} \quad (i_1 - i'_1) \cdot r = (i'_2 - i_2) \cdot a \; .$$

$$i_4 \cdot c + i_3 \cdot b = i'_4 \cdot c + i'_3 \cdot b$$

или $$\text{II.} \quad (i_4 - i'_4) \cdot c = (i'_3 - i_3) \cdot b \; .$$

Деление 1-го уравнения на 2-ое дает

$$\frac{(i_1 - i'_1) \cdot r}{(i_4 - i'_4) \cdot c} = \frac{(i'_2 - i_2) \cdot a}{(i'_3 - i_3) \cdot b} \; .$$

Согласно первому закону Кирхгофа имеем:

$$a)\quad i_1 = i + i_4 \quad \text{и} \quad b)\quad i_2 = i + i_3$$
$$i'_1 = i + i'_4 \qquad\qquad i'_2 = i + i'_3$$

откуда вычитанием получаем:

$$a)\quad i_1 - i'_1 = i_4 - i'_4 \quad \text{и} \quad b)\quad i'_2 - i_2 = i'_3 - i_3\ ,$$

так что в вышеприведенном уравнении выпадают коэффициенты, содержащие силы тока и остается конечное уравнение:

$$\frac{r}{c} = \frac{a}{b}\ .$$

Таким путем можно определить сопротивление элемента r в зависимости от отдаваемой им силы тока i_1, чтобы получить графическую картину изменения сопротивления можно эти значения r и i_1 нанести в прямоугольных координатах. Чтобы не слишком нагружать элемент следует пользоваться гальванометром с большим сопротивлением. Измерение особенно чувствительно в том случае, когда отклонения гальванометра близки к нулю; поэтому при больших отклонениях прибор с магнитной стрелкой приводят назад к нулевому положению с помощью направляющего магнита.

---

11. Сопротивление элементов.

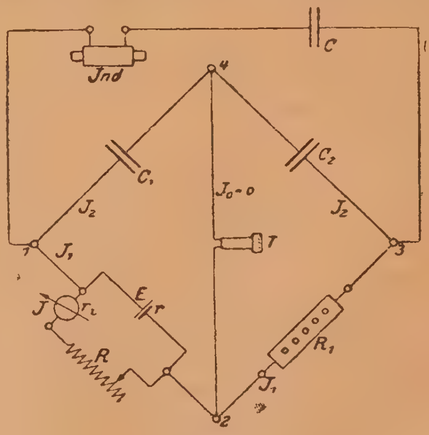
(Нернст—Nernst).

Для измерения по этому методу пользуются схемой фиг. 47.

Обозначения на ней:

Ind = индукционная катушка; C C_1 C_2 = конденсаторы; T = телефон; R R_1 = известные сопротивления; E = элемент; r = его внутреннее сопротивление; J = амперметр.

При известном сопротивлении R и нагрузочном токе J регулируют R_1 до тех пор, пока не получат в телефоне минимум или отсутствие звука. Вместо телефона можно пользоваться вибрационным гальванометром (§ 26). При этом условии сопротивление W ветви 1,2 определится, так же как в методе де-Соти (§ 35), на основании следующего: в ветви 1, 2, 3, имеем ток J_1 и в ветви 1, 4, 3 ток J_2. Кроме того $E_{12} = E_{14}$; и $E_{23} = E_{43}$.



Фиг. 47.

Далее:

1. $E_{12} = J_1 \cdot W$
2. $E_{23} = J_1 \cdot R_1$
3. $E_{14} = J_2 \cdot \dfrac{1}{\omega \cdot C_1}$
4. $E_{43} = J_2 \cdot \dfrac{1}{\omega \cdot C_2}$.

из 1-го и 3-го уравнений следует

$$J_1 \cdot W = J_2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_1}$$

из 2-го и 4-го

$$J_1 . R_1 = J_2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_2} .$$

Деля одно уравнение на другое находим:

$$\frac{W}{R_1} = \frac{C_2}{C_1}$$

Так как $W = \frac{r \cdot (R + r_i)}{r + R + r_i}$ должно быть также как выше, где сопротивлением амперметра r_i в большинстве случаев можно пренебречь по сравнению с R, то имеем:

$$r = \frac{W \cdot (R + r_i)}{R + r_i - W} .$$

---

12. Удельное сопротивление металлов.

Сопротивление проводника длиною l *m* и сечением q *mm*² выразится формулой:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{q}$$

отсюда удельное сопротивление:

$$\rho = \frac{R}{\frac{l}{q}}$$

определяется, как сопротивление единицы длины и сечения данного проводника.

Если с помощью какого либо метода для измерения сопротивлений (3, 5, 6, 7, 8, 26), определим R и относящиеся к нему l и q, то можем вычислить по этим данным и ρ. Так как на сопротивление влияет температура (срав. § 24), то ее всегда нужно указывать для данного значения ρ.

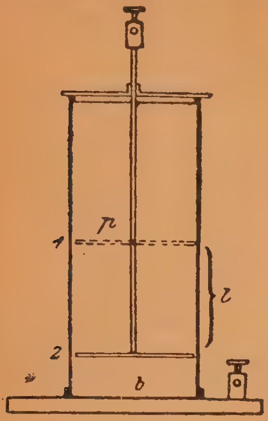
---

13. Удельное сопротивление жидкостей.

(Измерение постоянным током).

Для измерения R пользуются циллиндрическим стеклянным сосудом с металлическим дном b и подвижной металлической пластиной p, которая одновременно служит электродом (фиг. 48). Сосуд наполняют исследуемой жидкостью и соединяют по схеме фиг. 49 с элементом, гальванометром и реостатом. При этом нужно иметь в виду, что на верхнем электроде, напр. при растворе сернокислой меди будет отлагаться слой окиси. Это мало изменит концентрацию раствора, так как тяжелые частицы кислоты опускаются вниз и тем регулируют плотность отдельных слоев. Пластину устанавливают в положении 1 и получают с помощью реостата R_1 удобное для наблюдения откло-

нения гальванометра α. Затем пластину передвигают вниз на расстояние l в положение 2, вследствие этого отклонение гальванометра увеличится. Это отклонение уменьшают до первоначальной величины α увеличивая сопротивление с R_1 до R_2. Теперь можно вычислить сопротивление выключенного столба жидкости длиною l:



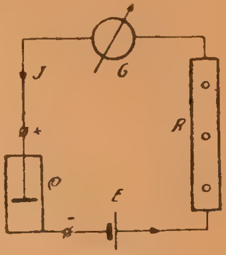
Фиг. 48.

$$R = R_2 - R_1 .$$

Если обозначить через e эл. дв. силу поляризации, то в первом случае

$$1. \quad E - e = J \cdot (R_1 + r_1) ,$$

где $R_1 + r_1$ обозначает сопротивление всей цепи. При втором положении пластины имеем при той же силе тока J, и при эл.-дв.силе поляризации e—сопротивление цепи



Фиг. 49.

$$R_2 + r_2 ;$$

тогда получаем:

$$2. \quad E - e = J \cdot (R_2 + r_2) .$$

Из уравнения 1-го и 2-го следует:

$$R_1 + r_1 = R_2 + r_2$$

или

$$R_2 - R_1 = r_1 - r_2 .$$

Но здесь $r_1 - r_2$ и есть сопротивление R выключенного столба жидкости l, так что

$$R = R_2 - R_1 .$$

Откуда получим

$$\rho = \frac{R_2 - R_1}{l} \cdot q .$$

Сечение q определяется как частное, $\frac{\text{об'ем}}{\text{длину}}$, его найдем измерив водой об'ем сосуда и масштабом его длину.

---

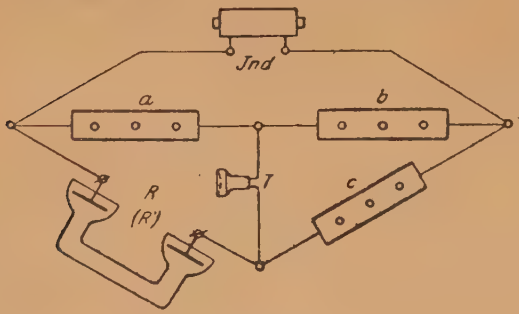
14. Удельное сопротивление жидкостей.

(Измерение переменным током).

Из'мерение при помощи постоянного тока может дать некоторую ошибку из-за поляризации, поэтому целесообразнее производить измерение с помощью переменного тока. При этом измерении вместо гальванометра обычно пользуются телефоном. Включение здесь то же как для измерительного мостика, только батарея и гальванометр заменены индукционной катушкой (*Ind*) и телефоном (*T*) (фиг. 50).

Сопротивление исследуемой жидкости R может быть измерено или в сосуде метода 13, или же в сосуде особой формы, величина сопротивления которого определяется с помощью нормального раствора с известным удельным сопротивлением. Очень употребительна U образная

форма стеклянного сосуда, замкнутого вверху двумя платиновыми пластинами покрытыми платиновой чернью. Проще всего для этого



Фиг. 50.

в предварительного измерения воспользоваться концентрированным раствором поваренной соли, проводимость которого, при 26,4% содержания NaCl и удельном весе 1,201 ($\vartheta = 18^0$), по Кольраушу, при температуре ϑ, сечении *1 mm*² и длине *1 m*, будет

$$\lambda_1 = [215 + 4{,}8 \cdot (\vartheta - 18°)] 10^{-7}$$

(при единице равной проводимости столба ртути длиной 1,603 *m.* и сечением *1 mm*² при температуре 0° С). Сосуд наполняют испытуемым раствором, при отсутствии звука в телефоне, сопротивление будет

$$R = \frac{a}{b} \cdot c$$

затем исследуемую жидкость заменяют раствором поваренной соли. В этом случае получают значения a', b', c'. Тогда сопротивление нормального раствора будет

$$R_1 = \frac{a'}{b'} \cdot c'$$

В обоих случаях жидкости налиты в одинаковый сосуд, так что можно принять

$$R = \frac{l}{q \cdot \lambda} \quad \text{и} \quad R_1 = \frac{l}{q \cdot \lambda_1}$$

если обозначить через λ_1 и λ проводимости нормального раствора и исследуемой жидкости, то можно написать

$$\frac{R_1}{R} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{R_1}{R} \cdot \lambda_1$$

Так как удельное сопротивление ρ есть величина обратная удельной проводимости, то

$$\frac{1}{\lambda} = \rho = \frac{R}{R_1 \cdot \lambda_1}$$

Другие нормальные растворы, которые легко составить, следующие:

Раствор уксуса при 16,6% $C_2H_4O_2$ и удельном весе 1,022

$$\lambda_1 = [1{,}62 + 0{,}029 \cdot (\vartheta - 18°)] \cdot 10^{-7}$$

Раствор сернокислой магнезии при 17,3% $MgSO_4$ (безводной) и удельном весе 1,187.

$$\lambda_1 = [48{,}8 + 1{,}28 \cdot (\vartheta - 18°)] \cdot 10^{-7}$$

Вместо телефона можно пользоваться вибрационным гальванометром (§ 26), или гальванометром переменного тока, построенным Франклином и Фрейденбергером[1]). Этот гальва-

нометр основан на принципе примененном еще Giltay [2]) разработанном лордом Рэлеем (Rayleigh) [3]). Измерительные приборы для слабых переменных токов, кроме того предложили Фогель [4]) и Кениг [5]).

В большинстве случаев индукционные аппараты и прерыватели не дают чистую синусоиду, и звук в телефоне никогда вполне не исчезает. Напротив, зуммерумформер фирмы Сименс и Гальске (ср. § 36) дает почти чисто синусоидальный ток при 300 ÷ 900 пер/секунду.

Хотя по Франке [6]) возможно большее число периодов должно давать особенно благоприятные условия для измерения, в действительности в этом случае скажется различная электростатическая емкость жидкости и эталонного сопротивления и настолько сильно, что вследствие разности фаз в обоих ветвях звук в телефоне никогда не исчезнет. Поэтому Эльзасом [7]) было предложено не употреблять для измерения частоты свыше 100 пер/сек., если не включен параллельно (по Кольраушу) [8]) конденсатор.

---

1) Phys. Rev. 37 (1907); El 654 (1907); ZfJ 168 (1907); (рефер.).
2) ZfJ. 397 (1886).
3) Phil. Mag. 343 (1897).
4) ETZ. 467 (1906).
5) ETZ. 1103 (1906).
6) ETZ. 606 (1897).
7) Wied. Ann. 44 (666).
8) Wied. Ann. 17 (65).

---

15. Исследование громоотводов.

Исследование сводится к следующим измерениям:

1. Сопротивление проводника от острия до заземляющей пластины.
2. Сопротивление заземления.

1. Сопротивление проводника.

Для этого испытания проводят вниз от приемного стержня специальный провод для измерения диаметром от 2 до 3-х *mm* и измеряют одним из известных методов сопротивление R_1 между концом этого провода и зажимом, заземляющей пластины. Если вспомогательный провод и провод к зажиму пластины обладают сопротивлением R_d, то сопротивление проводника громоотвода будет:

$$R = R_1 - R_d\ .$$

2. Сопротивление заземления.

а) Метод двух вспомогательных заземлений (Нипподьдт — Nippoldt) [1])

В качестве вспомогательного заземления можно применять газовые и водопроводные трубы, специально закопанную в землю медную пластину или глубоко вбитую в землю железную штангу, или лом, вокруг которого почва хорошо смачивается.

Измерительные провода с собственным сопротивлением R_d присоединяют к заземляющей пластине с сопротивлением R и к вспомогательному заземлению H_1, затем с помощью мостика переменного тока измеряют сопротивление R_1 между концами проводников (фиг. 50).

После чего переключают один измерительный провод от H_1, к вспомогательному заземлению H_2 и определяют сопротивление R_2. Далее измеряют сопротивление R_3 между H_1 и H_2.

Так как заземляющие пластины были включены последовательно, то

$$R_1 = R + H_1$$

$$R_2 = R + H_2$$

$$R_3 = H_1 + H_2$$

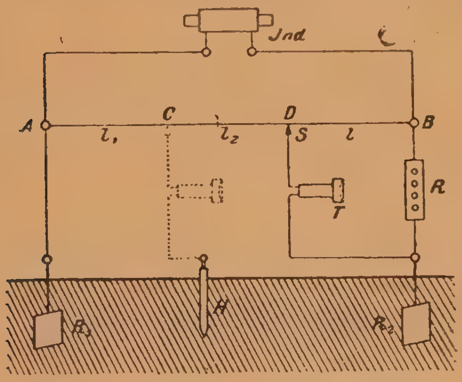
По трем измеренным величинам находим

$$R = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}.$$

в) Метод одного вспомогательного заземления (Вихерт—Wiechert) [2].

Исследуемые заземляющие пластины R_1 и R_2 (фиг. 51) присоединяют вместе с дополнительным сопротивлением R к измерительной проволоке AB.

Затем, передвигая скользящий контакт S, находят, с помощью телефона T или гальванометра переменного тока, точки D и C потенциала равного потенциалу R_2 и вспомогательного заземления H. Тогда имеют место следующие отношения:



Фиг. 51.

$$\frac{l_1}{l} = \frac{R_1}{R}, \qquad \frac{l_2}{l} = \frac{R_2}{R},$$

из чего следует:

$$R_1 = \frac{l_1}{l} \cdot R \qquad \text{и} \qquad R_2 = \frac{l_2}{l} \cdot R.$$

Изменение места H не должно оказывать заметного влияния на результат, что проверяют несколькими контрольными измерениями.

Для удобного и быстрого испытания громоотводов имеется большое количество аппаратов [3]), построенных фирмами Сименс-Гальске, Гартман-Браун [4]), Микс Генест [5]), Мейер [6]) Руструт и другими. Способ их употребления легко понять из прилагаемых при них инструкций.

---

1) CfE (8) 159.
2) ETZ. 726 (1893).
3) El Anz. 136 (1906).
4) ETZ. 521 (1911). (Stössel)
5) ETZ. 593 (1911), (Wurm)
6) ETZ. 34 (1908).

16. Сопротивление стыков рельс.

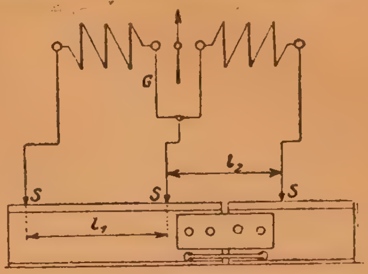
С помощью дифференциального гальванометра по схеме фиг. 52 определяют длину l рельса, соответствующую сопротивлению R стыка, во время опыта через рельс проходит ток.

Ползушку S передвигают до тех пор пока гальванометр не покажет отсутствие отклонения. Тогда длина

$$l_1 = l + l_2 \quad \text{или} \quad l = l_1 - l_2 \;.$$

Отсюда следует:

$$R = \frac{l \cdot \rho}{q} \,,$$



Фиг. 52.

где ρ обозначает удельное сопротивление материала рельс, а q их сечение. Сравнить еще: ETZ. 1899, стр. 163; 1901, стр. 269, 391, 1038; 1902, стр. 720, 841.

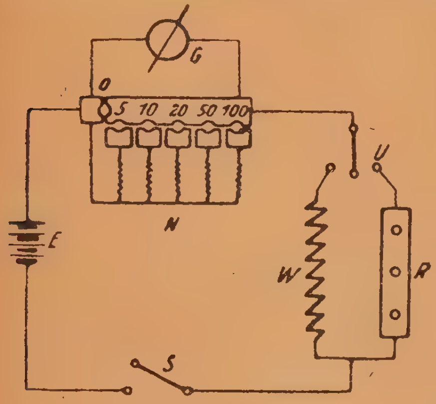
Другой метод измерения с помощью мостика Уитстона дан Монпеллье (Montpellier) [1])

[1]) Electr. 54 (1910).

17. Измерение сопротивления изоляции.

а) Метод прямого отсчета.

При измерении по этому методу следует применять относительно высокие напряжения, а при испытании изоляции уложенных проводов в готовых установках по возможности нормальное рабочее напряжение. Включение делается по схеме фиг. 53, причем применяют зеркальный гальванометр высокой чувствительности с шунтом N для изменения чувствительности. Вспомогательные приборы, переключатель и соединительные проводники должны быть хорошо изолированы и установлены на парафиновых пластинах, или на высоких подставках из эбонита, чтобы не внести ошибку в измерение. Если W — измеряемое сопротивление, при котором через гальванометр протекает ток J_1, вызывая отклонение α_1 а R эталонное сопротивление (около 100.000 Ω), при включении которого будет протекать ток J_2 и гальванометр покажет отклонение α_2, то



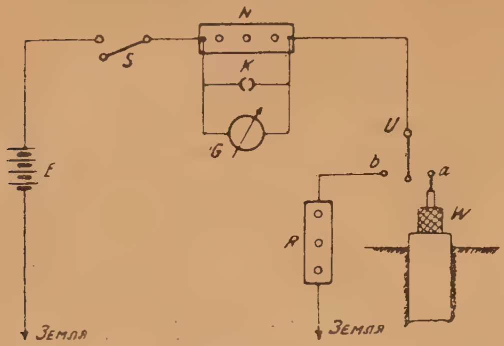
Фиг. 53.

$$E = J_2 \cdot R = J_1 \cdot W$$

или

$$\frac{W}{R} = \frac{J_2}{J_1} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \,,$$

если сохраняется пропорциональность между силой тока и отклонением, что обычно и бывает при малых углах отклонения.



Фиг. 54.

При измерении изоляции кабелей составляют соединение по схеме фиг. 54.

Здесь R—эталонное сопротивление, W—сопротивление изоляции по отношению к земле. Чтобы устранить влияние на результат сопротивления изоляции испытательной установки, устанавливают переключатель U между контактами a и b, так что W и R выключены, и замыкая ключ тока S определяют угол отклонения α_0. Если при сопротивлениях R и W получены отклонения α_1 и α_2, то можем написать отношение:

$$\frac{W}{R}=\frac{\alpha_2-\alpha_0}{\alpha_1-\alpha_0}\ .$$

Если шкала (границы измерения) гальванометра увеличена включением шунта в σ раз, при чем $\sigma>1$, то уравнение примет следующий вид:

$$\frac{W}{R}=\frac{\sigma_2\cdot\alpha_2-\sigma_0\cdot\alpha_0}{\sigma_1\cdot\alpha_1-\sigma_0\cdot\alpha_0}\ .$$

При всех измерениях изоляции кабелей или аппаратов, обладающих емкостью, нужно штепселем K замыкать накоротко гальванометр перед каждым замыканием или размыканием ключа тока, чтобы зарядные или разрядные токи не повредили гальванометр. Кроме того сопротивление изоляции зависит от продолжительности замыкания тока, температуры, влажности и напряжения, почему эти данные нужно всегда приводить, чтобы сделать возможным сопоставление. Если кабель имеет длину l *km.*, то сопротивление его на 1 *km.* будет:

$$W_1=l\cdot W\ ,$$

так как сечение окружающей кабель земли или воды пропорционально длине, а сопротивление изоляции изменяется обратно пропорционально сечению, а следовательно, и длине.

Чтобы устранить возможную ошибку, вследствие поверхностной проводимости свободных концов кабеля к гальванометру, по Прайсу (Price), надевают вокруг изоляции свободного конца кабеля защитную (броневую) проволоку или кольцо и соединяют его с ключом S, или с клеммой гальванометра, соединенной с источником тока. Ток, который пошел бы через гальванометр, по поверхности изоляции и в землю или в воду, благодаря этому приему минует гальванометр.

Аппарат, работающий по этому методу, легко переносимый с места на место, изготовляет фирма Гартман & Браун.

b) С помощью электрометра.

При очень больших сопротивлениях изоляции кабелей отклонение гальванометра при измерении по способу а) будет слишком мало. В этом случае лучше воспользоваться методом Сименса. Именно, если

зарядить кабель постоянным током до напряжения E вольт, то при сопротивлении изоляции $R\ \Omega$ и емкости C фарад, это напряжение понизится через t_1 секунд до величины измеряемой электрометром.

$$E_1 = E \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t_1},$$

где $e = 2{,}718$ — основание натуральных логарифмов. Логарифмируя получим

$$\text{I.} \qquad R = \frac{t_1}{C \cdot ln \frac{E}{E_1}} = \frac{t_1}{C \cdot 2{,}3 \cdot \log \frac{E}{E_1}}.$$

Напряжения E и E_1 можно также определить по отклонениям баллистического гальванометра α и α_1 (§ 35). C можно измерить по методам § 36 ÷ 40.

Чтобы избежать измерения неизвестной емкости, производят, по Фишеру-Хиннену (Fischer-Hinnen)[1]) второе измерение, при котором включают параллельно электрометру большое известное сопротивление R_n. При начальном напряжении E' измеряют спустя t_2 секунд напряжение

$$E_2 = E' \cdot e^{-\frac{1}{R_2 \cdot C} \cdot t_2},$$

где теперь $R_2 = \dfrac{R \cdot R_n}{R + R_n}$ обозначает общее разрядное сопротивление кабеля. Отсюда следует:

$$\text{II.} \qquad R_2 = \frac{R \cdot R_n}{R + R_n} = \frac{t_2}{C \cdot l_n \frac{E'}{E_2}} = \frac{t_2}{C \cdot 2{,}3 \cdot \log \frac{E'}{E_2}}.$$

Разделив I-ое уравнение на II-ое получим после преобразования:

$$R = R_n \cdot \left(\frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{\log \frac{E'}{E_2}}{\log \frac{E}{E_1}} - 1 \right).$$

Для упрощения подсчета можно сделать $\dfrac{E'}{E_2} = \dfrac{E}{E_1}$, если измерить время t_2, за которое напряжение E' понизилось до заранее вычисленной величины $E_2 = E_1 \cdot \dfrac{E'}{E}$. В этом случае получим:

$$R = R_n \cdot \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right).$$

Это измерение повторяют при различных напряжениях E_1, затем вычисляют по длине l в km сопротивление изоляции на 1 km длины $R_0 = R.l$ и изображают графически R_0, как функцию от E_1. Во все время

опыта следует измерять температуру и поддерживать ее по возможности постоянной. Если измерения должны быть произведены на месте установки, то пользуются или вагоном для испытания кабелей, или, при небольшой точности измерения, переносным аппаратом для измерения изоляции кабелей, в том виде как он, например изготовляется фирмой Сименс & Гальске [2]).

Для измерения переходного,—поверхностного и удельного сопротивления изоляторов Куртис [3]) предложил баллистический и электрометрический методы. Описание приборов для измерения переходного и поверхностного сопротивлений можно также найти в сокращенных инструкциях для испытания изолирующих материалов [4]) Союза Германских Электротехников (VdE).

1) ETZ 105 (1916). 2) Druckschrift (100) Nov (1906), 3) Bull Bur, Stand (11) 359; ETZ 469 (1916). 4) EГZ 452 (1912); 688 (1913).

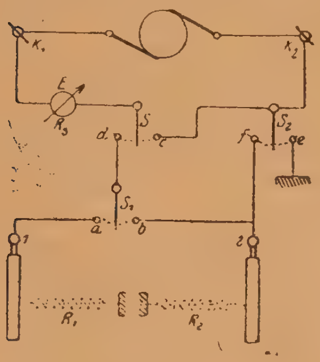
---

18. Испытание изоляции готовых установок посредством вольтметра[1]).

Выключают всю нагрузку и катушки напряжения счетчиков и удаляют предохранители, так, чтобы с машиной можно было соединить только сеть, изоляцию которой испытывают.

Удалив оба предохранителя между клеммами K_1 и 1, а также K_2 и 2 соединяют установку по схеме фиг. 55. Сначала переключатель S_2 переводят на точку e и S_1 на a. Затем, поставив переключатель S на c, определяют напряжение генератора E после чего быстро переводят S на d и отсчитывают E_1. Если вольтметр имеет собственное сопротивление R_s, то при сопротивлении изоляции 1-го провода R_1 по отношению к земле, пойдет ток

$$J_1 = \frac{E}{R_s + R_1}.$$



Фиг. 55.

Подставив сюда

$$J_1 = \frac{E_1}{R_s},$$

получим

$$\frac{E_1}{R_s} = \frac{E}{R_s + R_1},$$

из чего следует:

$$\frac{E}{E_1} = \frac{R_s + R_1}{R_s}$$

или

$$R_1 = R_s \cdot \left(\frac{E}{E_1} - 1\right).$$

Подобным же образом поступают для провода 2, для чего переводят переключатель S_1 на b и делают быстро один за другим два отсчета — при переключателе S в положениях c и d. Если установить S_1 так, чтобы он одновременно касался контактов a и b и отсчитать при положении c переключателя S напряжение E, и при положении d напряжение E_3, то получим общее сопротивление обоих проводов по отношению к земле.

$$R_3 = R_s \cdot \left(\frac{E}{E_3} - 1\right) = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Если хотят еще испытать взаимную изоляцию R_4 проводов по отношению друг к другу, то переводят S_2 на f, S_1 на a и S сначала на c, затем на d; это даст отсчеты E и E_4, откуда

$$R_4 = R_s \cdot \left(\frac{E}{E_4} - 1\right) = R_1 + R_2 .$$

Сопротивление вольтметра должно быть приблизительно от 100 до 500 Ω на вольт.

При испытании удобна следующая таблица:

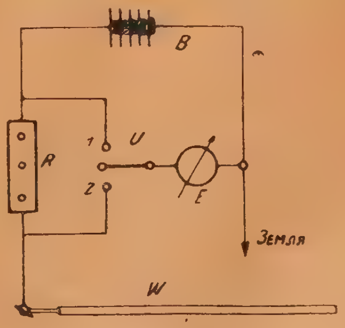
№	S_2	S_1	S	Отсчет	Сопротивление
1	e	a	c d	E E_1	R_1
2	e	b	c d	E E_2	R_2
3	e	ab	c d	E E_3	$R_3 = \frac{R_1 . R_2}{R_1 + R_2}$
4	f	a	c d	E E_4	$R_4 = R_1 + R_2$

Вместо машины, как источником тока, можно пользоваться вспомогательной батареей (сухие элементы). Целесообразно при этом соединять отрицательный полюс с испытуемым проводом, а положительный с землей. При таком соединении сопротивление слоя окиси, которая может быть на проводе, вследствие электролитического действия тока, будет сведено к минимуму. По этой же причине в двухпроводных установках сопротивление изоляции на отрицательном полюсе оказывается в большинстве случаев меньше, чем на положительном. Дальнейшие подробности можно найти в § 17 инструкций безопасности Союза Германских Электротехников (VdE).

[1]) ETZ. 660 (1896) (May).

19. Испытание изоляции готовых установок с помощью электростатического вольтметра.

Таким же образом, как по методу прямого отсчета, можно испытать сопротивление изоляции неработающих проводов или установок, с помощью электростатического вольтметра [1]). Для этого применяется схема фиг. 56.



Фиг. 56.

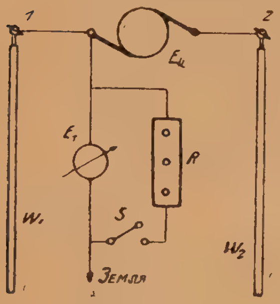
Испытуемый провод приключается последовательно с известным сопротивлением R к одному полюсу батареи B, другой полюс которой отводится к земле. С помощью электростатического вольтметра E сначала измеряют, при переключателе U на контакте 1, напряжение $E_1 = J . (R + W)$; затем при положении 2 измеряют падение

напряжения только в сопротивлении W, при том же токе $E_2 = J . W$, на основании чего

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R + W}{W} \quad \text{или} \quad W = \frac{E_2}{E_1 - E_2} \cdot R \ .$$

Чтобы E_2 заметно отличалось от E_1, R должно быть не слишком мало по сравнению с W.

Если провода 1 и 2 двухпроводной установки (фиг. 57) обладают сопротивлением изоляции W_1 и W_2 по отношению к земле, и между ними действует рабочее напряжение E_{k}, то вольтметр сначала включают на 1 и землю и отсчитывают E_1, затем замыкают S, при чем получают напряжение E_2, тогда общее сопротивление изоляции будет



Фиг. 57.

$$W = R \cdot \left(\frac{E_1}{E_2} - 1\right) \ .$$

Для доказательства этого уравнения нарисуем в упрощенном виде (фиг. 58) схему включения для измерения E_1.

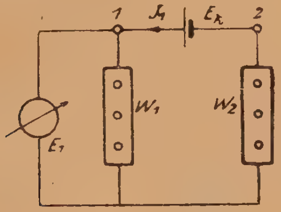
Здесь W_1 и W_2 включены последовательно, поэтому

$$E^{k} = J_1 . (W_1 + W_2) \text{ и } E_1 = J_1 . W_1,$$

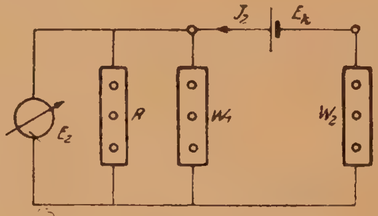
из чего следует:

$$\text{I.} \quad \frac{E_1}{E_k} = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \ .$$

Если теперь включим параллельно W_1 сопротивление R (фиг. 59), то получим:



Фиг. 58.



Фиг. 59.

$$E_k = J_2 \cdot \left(\frac{W_1 \cdot R}{W_1 + R} + W_2\right) = J_2 \cdot \left[\frac{R \cdot (W_1 + W_2) + W_1 \cdot W_2}{W_1 + R}\right]$$

и

$$E_2 = J_2 \cdot \frac{W_1 \cdot R}{W_1 + R} \ .$$

Посредством деления находим:

$$\text{II.} \quad \frac{E_2}{E_k} = \frac{W_1 \cdot R}{R \cdot (W_1 + W_2) + W_1 \cdot W_2} \ .$$

Из уравнений I-го и II-го далее следует:

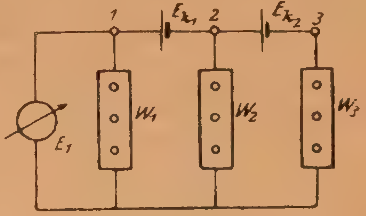
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R \cdot (W_1 + W_2) + W_1 \cdot W_2}{(W_1 + W_2) \cdot R}$$

или
$$\frac{E_1 - E_2}{E_2} = \frac{W_1 \cdot W_2}{(W_1 + W_2) \cdot R} = \frac{W}{R} ,$$

где
$$W = \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2}$$

есть общее сопротивление изоляции установки по отношению к земле. Наконец, посредством преобразования получим:

$$W = R \cdot \left(\frac{E_1}{E_2} - 1\right) ,$$



Фиг. 60.

что и было выше дано. Так как E_k может быть измерено, то можем определить W_1 и W_2 порознь.

При трехпроводной установке с отдельными напряжениями E_{k_1} и E_{k_2} (фиг. 60) получим то же уравнение. Именно, если приключить вольтметр на клемму 1, то он покажет напряжение

1. $E_1 = J_1 \cdot W_1$. Далее

2. $E_{k_1} = J_1 \cdot W_1 + (J_1 - J_2) \cdot W_2 = J_1 \cdot (W_1 + W_2) + J_2 \cdot W_2$.

3. $E_{k_2} = J_2 \cdot W_3 - (J_1 - J_2) \cdot W_2$.

4. $E_{k_1} + E_{k_2} = J_1 \cdot W_1 + J_2 \cdot W_3$.

Разделив уравнение 2 на W_2 и уравнение 4 на W_3, получим:

5. $\frac{E_{k_1}}{W_2} = J_1 \cdot \frac{W_1 + W_2}{W_2} - J_2$.

и

6. $\frac{E_{k_1} + E_{k_2}}{W_3} = J_1 \cdot \frac{W_1}{W_3} + J_2$.

Сложение уравнений 5 и 6 дает

7. $\frac{E_{k_1}}{W_2} + \frac{E_{k_1} + E_{k_2}}{W_3} = J_1 \cdot \left(\frac{W_1 + W_2}{W_2} + \frac{W_1}{W_3}\right)$

Из уравнения 1 и 7 следует
$$\frac{E_1}{\frac{E_{k_1}}{W_2} + \frac{E_{k_1} + E_{k_2}}{W_3}} = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3}{W_1 \cdot W_3 + W_2 \cdot W_3 + W_1 \cdot W_2} = W ,$$

или
$$\text{I.} \quad E_1 = \left(\frac{E_{k_1}}{W_2} + \frac{E_{k_1} + E_{k_2}}{W_3}\right) \cdot W = c \cdot W .$$

Если теперь включить параллельно вольтметру известное сопротивление R, то он покажет некоторое напряжение E_2, и мы должны вместо W подставить в вышеприведенное уравнение общее сопротивление W и R, именно $\frac{W \cdot R}{W + R}$, из чего следует

$$\text{II.} \quad E_2 = c \cdot \frac{W \cdot R}{W + R} .$$

Из уравнения I и II затем получим:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W+R}{R}, \quad \text{или} \quad \frac{E_1 - E_2}{E_2} = \frac{W}{R}$$

и таким образом опять

$$W = R\left(\frac{E_1}{E_2} - 1\right).$$

Однако, в этом случае нельзя определить отдельные сопротивления W_1, W_2, W_3. Изо всего приведенного видно, что эта формула пригодна для любой многопроводной установки.

[1]) ETZ. 547 (1904).

20. Измерение изоляции линии во время работы.

Из многочисленных методов, предложенных Мюллендорфом (Müllendorf)[1]), Скутчем (Skutsch)[2]), Фрэлихом (Frölich)[3]) и Кальманом (Kallmann)[4]), здесь будут рассмотрены только простейшие и наиболее употребительные. Если пользуются статическим вольтметром, то формулы упрощаются, т. к. тогда $\frac{1}{R_s} = 0$.

a) **Метод Фриша** (Frisch)[5]).

При этом измерении вольтметр с собственным сопротивлением R_s приключается одним полюсом к земле, а другим попеременно к обоим проводам двухпроводной линии. Пусть измерение дало напряжение E_1 между проводом I и землей, E_2 (в обратном направлении) между II и землей, и напряжение в сети E[6]); составляем уравнения:

$$1. \quad E_1 = E - J_1 \cdot R_2$$

$$2. \quad J_1 = \frac{E}{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_s}} + R_2}$$

$$3. \quad E_2 = E - J_2 \cdot R_1$$

$$4. \quad J_2 = \frac{E}{\frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_s}} + R_1}$$

Подсчитав из уравнений 1 и 3 значения J_1 и J_2 и подставив их в уравнения 2 и 4 получим после некоторых преобразований:

$$5. \quad \frac{E - E_1}{E_1} = \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_s}$$

и
$$6.\quad \frac{E-E_2}{E_2}=R_1\cdot\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_s}\right)$$

или
$$\frac{E}{E_1}=\frac{R_2\cdot R_s+R_1\cdot R_2}{R_1\cdot R_s}+1=\frac{R_1\cdot R_2+R_1\cdot R_s+R_2\cdot R_s}{R_1\cdot R_s}$$

$$\frac{E}{E_2}=\frac{R_1\cdot R_s+R_1\cdot R_2}{R_2\cdot R_s}+1=\frac{R_1\cdot R_2+R_1\cdot R_s+R_2\cdot R_s}{R_2\cdot R_s},$$

и посредством деления обоих уравнений

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{R_1}{R_2}.$$

Подстановка в уравнения 5 и 6 дает:

$$\frac{1}{R_1}=\frac{E_2}{(E-E_1-E_2)\cdot R_s}$$

и

$$\frac{1}{R_2}=\frac{E_1}{(E-E_1-E_2)\cdot R_s}$$

откуда имеем:

$$\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}=\frac{1}{R}=\frac{1}{R_s}\cdot\frac{E_1+E_2}{E-(E_1+E_2)}.$$

Общее сопротивление обоих проводов по отношению к земле

$$\mathbf{R}=\mathbf{R_s}\cdot\left(\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{E_1}+\mathbf{E_2}}-1\right).$$

Для быстрого графического определения R_1 и R_2 О. Гейнрих, главный инженер Weston Co., составил диаграмму [7]) с E в качестве абсциссы и ординатой R. Если при этом измерении $E_1+E_2>E$, то следует применять вольтметр с небольшим собственным сопротивлением или амперметр с дополнительным сопротивлением и предохранителем. Если R_s очень велико по сравнению с R, напр. при больших сетях, в которых $R<50\ \Omega$, то выражение в скобках будет мало или $\frac{E}{E_1+E_2}$ немного больше 1. В этом случае маленькая ошибка отсчета на измерительном приборе очень сильно повлияет на результат. Например при $E=110$ вольт и $R=50\ \Omega$ ошибка в отсчете на 0,5% вызовет в результате ошибку на 10%. Для установок с $R>100\ \Omega$ можно употреблять $R_s>1.000\ \Omega$.

В многопроводных установках с незаземленным средним проводом измеряют напряжение E между двумя соседними проводами, а также E_x и соответственно E_y между этими проводами и землей, по этим данным определяют общее сопротивление изоляции R, по отношению к земле из формулы

$$R=R_s\cdot\left(\frac{E}{E_x-E_y}-1\right).$$

Пример: В двухпроводной установке с $2\,E = 2.220\ V$ напряжение измерено прибором с подвижной катушкой и $R_s = 2400\ \Omega$:

$$E_1 = +223{,}0\ V;\quad E_2 = +11{,}5\ V;\quad E_3 = -200{,}2\ V.$$

Из этих данных следует

$$R = R_s\left(\frac{E}{E_1 - E_2} - 1\right) = R_s\left(\frac{E}{E_2 - E_3} - 1\right),$$

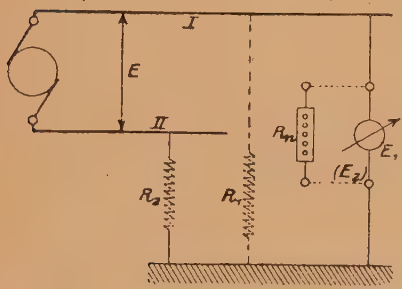
или $$R = 2400 \cdot \left(\frac{220}{223{,}0 - 11{,}5} - 1\right) = 2400 \cdot \left(\frac{220}{11{,}5 + 200{,}2} - 1\right) \cong 96\ \Omega.$$

Из этого примера ясно влияние, слишком большой величины R_s, по сравнению с R при неточных отсчетах.

Этот метод особенно удобен для длительного наблюдения двухпроводной установки; для такого наблюдения каждый полюс соединяют с землей через регистрирующий вольтметр; этим методом целесообразно также пользоваться при сетях постоянного тока высокого напряжения.

b) Метод шунта (Фрэлих) [8].

На фиг. 61 R_1 и R_2 оба сопротивления изоляции двухпроводной установки с напряжением E. С помощью вольтметра с большим известным сопротивлением R_s измеряют сначала напряжение E_1 между проводом I и землей. Если при этом (кроме рабочего тока) будет протекать ток J_1 (через изоляцию и вольтметр), то будут иметь место отношения



Фиг. 61.

$$1.\quad E_1 = J_1 \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_s}}$$

$$2.\quad E = E_1 + J_1 R_2 .$$

Затем к вольтметру включают шунт R_n, пусть при этом измерение покажет напряжение E_2 и вместо J_1 потечет ток J_2. В этом случае

$$3.\quad E_2 = J_2 \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_n}} .$$

$$4.\quad E = E_2 + J_2 \cdot R_2 .$$

Исключив J_1 и J_2 получим

$$E_1 = \frac{E - E_1}{R_2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_s}};\qquad E_2 = \frac{E - E_2}{R_2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_n}} .$$

и отсюда:

$$\text{I.}\quad \frac{1}{R_2} = \frac{1}{E} \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{(E_1 - E_2) \cdot R_n}$$

$$\text{II.}\quad \frac{1}{R_1} = \frac{E_2}{(E_1 - E_2) \cdot R_n} \cdot \left(1 - \frac{E_1}{E}\right) - \frac{1}{R_s}.$$

Общее сопротивление R обоих проводов по отношению к земле определится из

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{E_2}{(E_1 - E_2) \cdot R_n} - \frac{1}{R_s}$$

именно

$$R = \frac{R_n \cdot R_s \cdot (E_1 - E_2)}{(R_n + R_s) \cdot E_2 - R_n \cdot E_1}$$

Если пользоваться для измерения электростатическим вольтметром с $R_s = \infty$, то соответствующим подбором R_n можно добиться $E_2 = \frac{E_1}{2}$, и тогда $R = R_n$. Если же взять $R_n = R_s$, то в результате

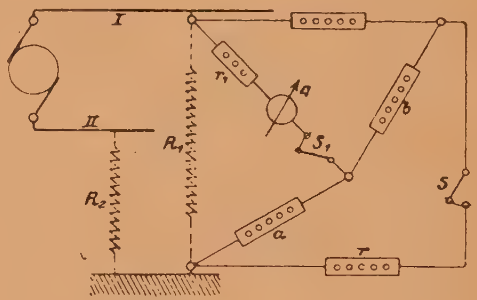
$$R = R_s \cdot \frac{E_1 - E_2}{2 E_2 - E_1}.$$

c) Метод Макса-Фрэлиха.

Схема включения этого метода (фиг. 62) напоминает схему измерения § 10.

Разность потенциалов на концах R_1 между проводом I и землей соответствует элементу E на фиг. 46. Сопротивления a, b, c регулируют таким образом, чтобы отклонение гальванометра не изменялось при замыкании и размыкании ключа S. В этом случае

$$R_1 = \frac{a}{b} \cdot c.$$



Фиг. 62.

Переставив переключатель на провод II и землю, находят R_2. Для предохранения измерительных приборов берут не слишком малые a, b, c и, кроме того, включают еще в замыкаемые ветви большие предохранительные сопротивления r_1 и r.

Чтобы избежать длительной нагрузки гальванометра током, включают, по Фрэлиху на место G первичную обмотку индукционной катушки, вторичную обмотку которой замыкают на гальванометр. При таком включении гальванометр должен не показывать отклонения при замыкании и размыкании S, В больших сетях, однако, измерению может помещать влияние емкости.

Этот метод позволяет измерить с большой точностью любое сопротивление изоляции.

d) Метод Бругера (Bruger) [9].

Согласно схеме фиг. 63, параллельно гальванометру G, между проводом (II) и землей, включают хорошо изолированную вспомогательную батарею E_h последовательно с известным сопротивлением r.

Машина E и батарея E_h должны быть включены навстречу. Затем регулируют r до тех пор пока G не покажет отсутствие отклонения; тогда между проводом II и землей нет разности потенциалов,

почему и в R_2 нет тока, а ток утечки J_1 проходит через R_1 и через r. Тогда имеем:

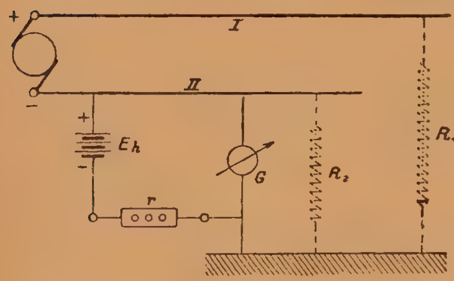
$$E = J_1 \cdot R_1 \qquad E_h = J_1 \cdot r$$

или

$$\frac{R_1}{r} = \frac{E}{E_h}.$$

Например, если взять $E_h = \frac{E}{10}$, то $R_1 = 10 . r$.

По этому принципу построен измеритель изоляции фирмы Hartman & Braun.



Фиг. 63.

В многопроводных установках с n равными напряжениями E, без заземленного провода суммарное сопротивление изоляции можно определить следующим образом

$$R = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \frac{1}{R_n},$$

При гальванометре, включенном между первым проводом и землей получено сопротивление r_1 при токе J_1, и таким же образом для n-ого провода r_n и J_n. Тогда получаем

$$J_1 = \frac{E_h}{r_1} \qquad J_n = \frac{E_h}{r_n}$$

и

$$I. \quad J_1 + J_n = \frac{(n-1) \cdot E}{R}.$$

Далее

$$II. \quad J_1 + J_n = E_h \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_n}\right) = E_h \cdot \frac{1}{r},$$

где r общее сопротивление r_1 и r_n. Из I-го и II-го следует:

$$R = r \cdot (n-1) \cdot \frac{E}{E_h}.$$

Этот метод не позволяет измерить в многопроводных установках сопротивление изоляции отдельных проводов по отношению к земле.

Однако, пользуясь способом Саулька (Sahulka)[10]) можно, посредством временного изменения напряжения части установки, определить состояние изоляции каждого провода по отношению к земле. Сходный способ предложили Капп (Kapp) и Коэлс (Coales)[11]).

e) Измерение изоляции трамвайных линий.

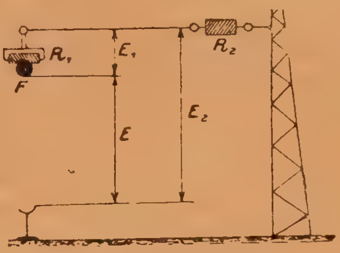
Испытанием нужно определить переходное сопротивление R_1 между подводящим ток проводом (троллейным проводом F при воздушной проводке или третьим рельсом) и подвесом (поддерживающим проводом или цоколем), а также R_2 между ним и путевым рельсом.

Определим, пользуясь схемой фиг. 64, по способу, описанному в пункте b), с помощью вольтметра с сопротивлением R_s (около

200 Ω на V), напряжения E, E_1, E_2; на основании этих данных можем составить следующие уравнения:

$$E_1 = E - J_1 \cdot R_2 \qquad J_1 = \frac{E}{\frac{R_1 \cdot R_s}{R_1 + R_s} + R_2}$$

$$E_2 = E - J_2 \cdot R_1 \qquad J_2 = \frac{E}{\frac{R_2 \cdot R_s}{R_1 + R_s} + R_1},$$



Фиг. 64.

откуда следует:

$$R_1 = R_s \cdot \left(\frac{E - E_1}{E_2} - 1\right)$$

и

$$R_2 = R_s \cdot \left(\frac{E - E_2}{E_1} - 1\right).$$

Другие методы предложили Портер[12]), Кальман[13]), Фельдман[14]), Стобрава (Stobrawa)[15]), Мэрк (Mörk)[16]), Пилье (Pillier)[17]). Для испытания изоляции троллейного (рабочего) провода фирма Everett, Edgcumbe & Co построила аппарат[18]), дающий возможность производить измерение во время езды.

f) Измерение изоляции аккумуляторов.

Поочередно включают на землю один и другой полюса батареи через предохранитель на малую силу тока, по возможности, с малым собственным сопротивлением. Если предохранитель перегорит, то значит имеется неисправность в изоляции мешающая работе. Если же этого не случилось, то по Либеноу (Liebenow)[19]), между одним полюсом и землей включают амперметр с небольшим собственным сопротивленим и измеряют ток J_1. Таким же путем измеряют ток J_2 между другим полюсом и землей. Тогда J_1 и соответственно J_2 содержат все отдельные токи, которые у n элементов с напряжением e вольт на элемент, проходят в землю. Пренебрегая потерей напряжения в амперметре, получим:

$$J_1 = \frac{e}{R_1} + \frac{2e}{R_2} + \ldots \frac{(n-2) \cdot e}{R_{n-2}} + \frac{(n-1) \cdot e}{R_{n-1}} + \frac{n \cdot e}{R_n}$$

$$J_2 = \frac{n \cdot e}{R_0} + \frac{(n-1) \cdot e}{R_1} + \frac{(n-2) \cdot e}{R_2} + \ldots + \frac{2e}{R_{n-2}} + \frac{e}{R_{n-1}}$$

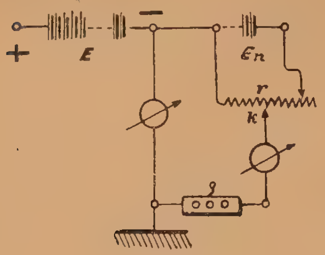
$$J_1 + J_2 = n \cdot e \cdot \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots \frac{1}{R_{n-2}} + \frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_n}\right)$$

или: $J_1 + J_2 = E \cdot \frac{1}{R}$, откуда определяем общее сопротивление изоляции R по отношению к земле:

$$R = \frac{E}{J_1 + J_2}$$

По напряжению батареи E и чувствительности амперметра можем определить предельную для измерения величину R. Для защиты прибора, последовательно с ним, включают сиротивление ρ, которое постепенно замыкают накоротко.

При больших значениях R, для измерения малых по силе токов J_1 и J_2, нужен амперметр с относительно большим сопротивлением. Если потеря напряжения в нем, вследствие ли его собственного или дополнительного сопротивления ρ, превышает приблизительно 0,5% от E, то таким же образом, как было указано в пункте d) (фиг. 63), включают последовательно с амперметром J (фиг. 65) вспомогательную батарею E_h и параллельно им (т.-е. амперметру и батарее), между данным полюсом и землей, гальванометр G.



Фиг. 65.

Передвигая k или изменяя r, можно добиться отсутствия тока в гальванометре, чем будет выполнено условие равенства потенциала полюса (—) и земли. Если вместо G пользуются ключом, то при его размыкании и замыкании, амперметр должен не менять показание. Если таким образом измерены для обоих полюсов J_1 и J_2, то опять:

$$R = \frac{E}{J_1 \div J_2}.$$

1) ETZ. 661 (1896); 313 (1906).
2) ETZ. 142 (1897).
3) ETZ. 192 (1895).
4) ETZ. 545 (1893); 683 (1898).
5) ZfE. Wien. 215, 218 (1889).
6) Переключатель для этого строит Weston Co., Berlin.
7) Druckschrift (103) 9.
8) ETZ 49 (1893).
9) ETZ. 901 (1902).
10) ETZ. 420 (1904).
11) El. Eng. (14) Mai (1909). 12) El. World 61 (1897).
13) ETZ. 156, 545 (1893). 14) ETZ. 80 (1898). 15) ETZ. 287 (1898).
16) ETZ. 6 и 82 (1905). 17) Jnd. El. 25 März (1904); ETZ. 481 (1904).
18) El. Revue, London, 13 Juli (1906).
19) ETZ. 360 (1899).

21. Измерение изоляции телефонных кабелей.

Диэлектрическое сопротивление кабеля должно быть измерено с помощью токов высокой частоты, так как при постоянном токе оно окажется значительно меньше вследствие отсутствия потерь вызываемых переменным полем. В качестве источников тока высокой частоты можно применять следующие аппараты:

1. Машины высокой частоты:

a) Конструкцию Криса (Kries)[1], в новейшей форме с улучшениями Франке[2], Макса Вина[3] и Долезалека (Dolezalek)[4], изготовляет фирма Simens & Halske[5]. Высшая частота достигает 10.000 пер./сек. Токи обладают почти чисто синусоидальной формой.

b) Конструкция Дудделя[6]. Она дает токи до 120.000 пер/сек. При 100.000 пер/сек. сила тока 0,1 амп. при 2 вольтах напряжения.

c) Конструкция Фессендена[7]. Дает $10^5 \div 4.10^5$ пер./сек.

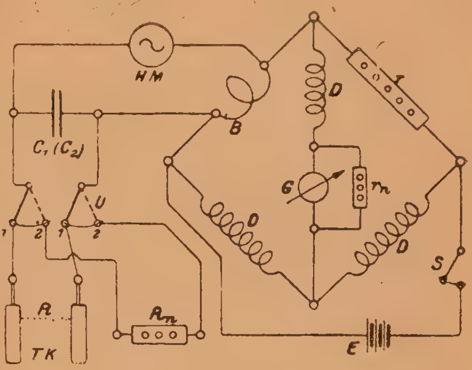
d) Конструкция Гартмана-Кемпфа[8]. Дает около 2500 пер./сек.

2. Лампа Поульсена[9]. В основу положено открытое Дудделем[10] явление, состоящее в том, что в цепи из самоиндукции

и емкости, включенной параллельно дуговой лампе постоянного тока, возникают токи высокой частоты, отвечающие условию резонанса $L \cdot C \cdot \omega^2 = 1$. Если дуга горит на воздухе, можно получить колебания до 40.000 пер./сек., если же ее поместить в атмосферу водорода или светильного газа, то до 10^6 пер./сек.

Для исследования кабеля применяют, по Бэла Гати (Bèla Gati)[11]) включение по схеме фиг. 66.

Машину высокой частоты *HM* можно включать через болометр *B*, находящийся в одной из ветвей мостика Уитстона, и через переключатель *U* или на телефонный кабель *TK* или на безиндукционное сопротивление R_n. Дроссельные катушки *D* служат защитой от токов высокой частоты, сопротивление r_n нужно для того, чтобы установить наиболее удобное отклонение. Болометр *B* — это тонкая платиновая проволока, толщиной 0,002 *mm*. Вследствие малой массы ее сопротивление изменяется очень сильно при различных токах. Болометр можно проградуировать с помощью известных, измеренных электродинамометром токов высокой частоты. Или же можно определить изменение сопротивления по сопротивлению *r* и построить градуировочную кривую *f* (*J*, *r*), как зависимость тока *J* в болометре от сопротивления *r*.



Фиг. 66.

Для кабелей, однако, нет необходимости в предварительном градуировании. Переключатель *U* ставят на контакт 1 и регулируют емкость конденсатора C_1 так, чтобы вследствие резонанса гальванометр дал наибольшее отклонение α_1. Затем размыкают *U* и при емкости C_2 получают вновь резонанс при отклонении α_2. После чего переводят *U* на контакт 2 и регулируют R_n до тех пор, пока α_2 не понизится до α_1. Тогда $R_n = R$ диэлектрическому сопротивлению изоляции кабеля.

Для измерения емкости подводных кабелей удобен метод, предложенный Дево-Шарбоннелом (Devaux-Charbonnel)[12]).

Как можно избежать различных источников ошибок, при измерении диэлектрических постоянных (сопротивления и емкости) телефонных кабелей, подробно указано Вагнером[13]).

Остальные испытания телефонных кабелей описаны в „Elektrizität und Magnetismus“ Вена 1908, стр. 413 (рефер.).

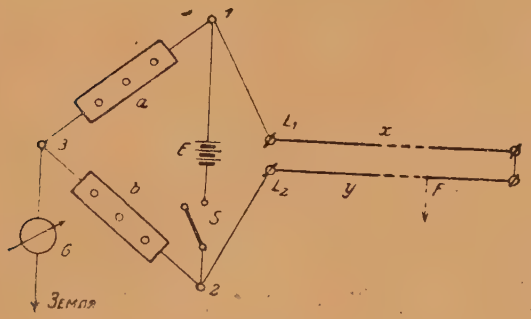
---

1) Verh. d. naturf. Ges. Freiburg 2 (1882).
2) Druckschrift 105, März (1906). 3) ETZ. 447. (1891).
4) Wied. Ann. 871 (1898); Ann. d. Ph. 426 (1901).
5) ZfJ. 240 (1903).
6) Phil. Mag. 299/309 (1905); Ann. d. El. 595 (1906); ZfJ. 131 (1906); (рефер.).
7) ETZ 1003 (1909); 1078 (1911); 660 (1912).
8) Phys. Z. (25) (1910). 9) ETZ 1040 (1906).
10) El. 269, 310 (1900). 11) El. u M. Wien. 263 (1908).
12) Rev. el. 305 (1906); Journ. telegr. 73 (1908); ETZ. 655 (1908).
13) ETZ. 1001 (1911); 635 (1912).

22. Определение места повреждения изоляции.

а) Метод петли Мёррея (Murray) — (нулевой метод).

Конец поврежденного провода соединяют с обратным проводом, проложенным по большей части параллельно исследуемому, или у кабелей с — заключенным в нем контрольным проводом. Затем оба другие конца соединяют с двумя известными сопротивлениями a и b в мостик Уитстона по прилагаемой схеме (фиг. 67).



Фиг.. 67.

Между точками мостика 1 и 2 включают, через ключ S, источник тока E, точку 3 приключают к одной клемме гальванометра G, другую клемму которого соединяют на землю. Если вследствие эл. дв. силы возникающей в месте повреждения, не удается получить определенного нулевого положения, то целесообразно поменять местами батарею и гальванометр. Пусть повреждение находится в точке F и сопротивление обоих проводов разделено им в отношении $\frac{x}{y}$, тогда при отсутствии тока в гальванометре $\frac{x}{y} = \frac{a}{b}$. Если измерить, кроме того, суммарное сопротивление $x + y = c$, то можно вычислить x и y следующим образом:

$$x = \frac{a}{a + b} \cdot c \qquad y = \frac{b}{a + b} \cdot c \; .$$

Отсюда по сопротивлениям x и y легко подсчитать расстояния до места повреждения.

При этом, однако, следует употреблять по возможности короткие соединительные провода $1 \div L_1$ и $2 \div L_2$ и с очень малым сопротивлением, в противном случае нужно вводить поправку к измеренной величине, именно нужно измерить отдельно сопротивления соединительных проводов и вычесть эти сопротивления из значений полученных для x и y.

Если хотят освободиться от большого влияния температуры на сопротивление соединительных проводов, то включают элемент на место G, а гальванометр прямо к концам кабелей L_1 и L_2. Тогда можно пренебречь сопротивлениями $1 \div L_1$ и $2 \div L_2$ по сравнению с сопротивлениями a и b. Целесообразно произвести второе измерение, взаимно переключив концы кабелей, и из обоих измерений взять среднее значение.

Приборы с непосредственным отсчетом изготовляют фирмы Jul. Stephenson, Hamburg [1]) и Land und Seekabelwerke A. G.. Cöln — Nippes [2]).

Для многопроводных кабелей простой метод дал Гирзинг (Giersing) [3]).

b) Метод Варлея (Varley).

Этот метод представляет собою изменение предыдущего, именно в ветвь $2 \div L_2$ включается еще известное сопротивление d. Производят два измерения:

1. Определение

$$\frac{x}{y+d}=\frac{a}{b}.$$

2. Измерение сопротивления петли $x+y$, при этом гальванометр или соответственно элемент включают между точками $3 \div L_2$, что дает

$$x+y=\frac{a_1}{b_1}\cdot d.$$

Из обоих измерений следует:

$$y=\frac{a_1 \cdot b - a \cdot b_1}{(a+b)\cdot b_1}\cdot d.$$

c) Метод падения напряжения.

В этом случае перед испытуемым кабелем включают известное сопротивление R_1 (кусок неповрежденного кабеля), к нему присоединяют один полюс измерительной батареи с постоянным напряжением, другой же полюс батареи заземляют. Ток пойдет по известному сопротивлению и кабелю через место повреждения в землю. Затем измеряют вольтметром с большим сопротивлением или гальванометром с пропорциональной шкалой разность потенциалов E_1 на известном сопротивлении и E между началом и концом кабеля. Так как за местом повреждения по кабелю проходит только маленький ток вольтметра, то

$$\frac{R}{R_1}=\frac{E}{E_1}$$

или

$$R=\frac{E}{E_1}\cdot R_1,$$

где R сопротивление кабеля до места повреждения.

Необходимость поддерживать постоянной силу тока во все время опыта затрудняет измерение; этого трудно достичь, благодаря меняющемуся сопротивлению места повреждения. Поэтому производят ряд измерений, одно за другим, до тех пор пока при переключении не получат отсутствие изменения результатов. С помощью дифференциального вольтметра это измерение можно вести по нулевому методу.

Когда нет обратного провода, контрольной проволоки или чего-либо подобного, то измеряют разность потенциалов E_1 на R_1 затем E_2 между началом кабеля и землей и, наконец, E_3, между концом кабеля и землей; на основании этих измерений составляем отношения:

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{R_1}{R+F} \quad \text{и} \quad \frac{E_1}{E_3}=\frac{R_1}{F}$$

где F обозначает переходное сопротивление между проводом и землей в месте повреждения.

Из этого следует:

$$R = \frac{E_2 - E_3}{E_1} \cdot R_1$$

Для контроля постоянства измерительного тока целесообразно включать между батареей и известным сопротивлением R_1 регулируемое сопротивление вместе с чувствительным амперметром.

Специальный прибор, работающий по этому методу, изготовляет фирма „Nadir“, Берлин [4]).

Вообще же методы петли и нулевой обладают большой простотой и свободны от ошибки, вызываемой поляризационным напряжением, которое заметно влияет на измерение по методу падения напряжения [5]).

Симонс (Simons) [6]) произвел обстоятельные исследования некоторых особых случаев определения места повреждения, а также случаев пробоя многофазных кабелей; для нахождения места этих пробоев Эренс (Ehrens) [7]) дал простой способ.

Простой и практичный способ нахождения повреждений кабеля предложен Вурмбахом (Wurmbach) [8]).

---

1) ETZ. 777 (1911). 2) ETZ. 991 (1912).
3) ETZ. 180 (1912). 4) ETZ. 972 (1913).
5) ETZ. 51,282 (1914). 6) ETZ. 708 (1914).
7) ETZ. 557 (1916). 8) ETZ. 211 (1919).

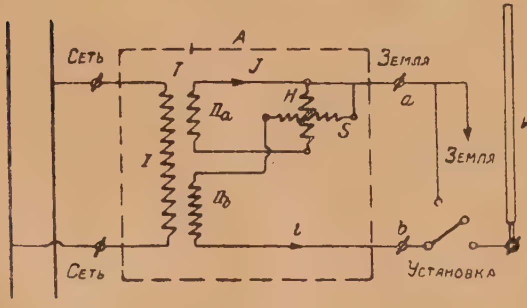
23. Испытание изоляции установок переменного тока.

Особое неудобство при измерениях изоляции с переменным током представляет собой зарядный ток, появляющийся вследствие емкости проводов и при неповрежденной изоляции. При напряжении на клеммах E вольт, при ν пер./сек. и общей емкости сети проводов по отношению к земле C микрофарад, зарядный ток будет

$$J_c = 2\pi \cdot \nu \cdot C \cdot E \cdot 10^{-6} \quad \text{амп.}$$

Влияние емкости трудно устранить, так как нелегко измерить емкость C изоляции. В установках же с большим сопротивлением изоляции и малой емкостью, где зарядный ток не оказывает влияния, например, в больших домовых сетях, наиболее употребительные измерительные приборы переменного тока не покажут малый по величине ток, идущий в землю.

Это препятствие устранено в измерителе изоляции для переменного тока [1]), изготовляемом фирмой Allgemeine Elektrititäts Gesellschaft, посредством того, что в неподвижную катушку прибора введен, с помощью трансформации, сильный возбуждающий ток J, как это показано на схеме аппарата (фиг. 68).



Фиг. 68.

В аппарате заключен маленький измерительный трансформатор T, первичная катушка I которого приключается к клеммам сети. Если приключить клемму b к установке, то прибор покажет непосредственно сопротивление.

С помощью статического и потребляющего ток (динамического) вольтметра Дина (Dina) [2]) определяет по напряжению полюса по отношению к земле нулевую точку установки, на основании чего затем строит диаграмму, из которой, кроме сопротивления изоляции, можно также определить емкость проводов установки.

Другой метод для определения повреждения изоляции установок переменного тока дал Дице (Dietze) [3]), по этому методу построен особый прибор изготовляемый фирмой Hartman & Braun.

Если не хотят пользоваться для измерения переменным током сети, то можно произвести измерение во время работы, как было описано в § 17, пользуясь постоянным током и измерительными приборами, на которые не действует переменный ток.

В установках высокого напряжения затруднительно производить измерения во время работы из-за опасности для жизни и больших зарядных токов. Поэтому в таких установках только контролируют состояние изоляции, для чего ежедневно определяют потенциал отдельных проводов по отношению к земле, лучше всего статическим вольтметром. Если потенциалы остаются равными, то состояние изоляции не изменилось. Напротив, если в одном проводе потенциал понизился, а в других повысился, то можно заключить о повреждении изоляции первого.

При напряжениях свыше 10.000 вольт пользуются статическим указателем земельного сообщения; он состоит из конденсатора, включенного между каждым полюсом и землей (напр., подвесной изолятор данной установки), и соединенной последовательно с этим конденсатором трубки Гейслера.

---

[1]) ETZ 410 (1899).
[2]) ETZ 513 (1912). [3]) ETZ 843 (1902); 35 (1911); 235 (1916).

24. Определение температурного коэффициента.

Так как сопротивление проводника зависит от температуры, то в величину сопротивления входит также значение температурного коэффициента α. Согласно уравнению

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)}$$

температурный коэффициент определяется как изменение сопротивления $(R_2 - R_1)$ на один ом первоначального сопротивления (R_1 при ϑ_1^0 C) при изменении температуры на 1^0 C $(\vartheta_2 - \vartheta_1)$.

Отсюда получаем сопротивление при конечной температуре ϑ_2:

$$R_2 = R_1 \cdot [1 + \alpha(\vartheta_2 - \vartheta_1)] \;.$$

Чтобы определить α, нужно только измерить R_1 при температуре ϑ_1^0 C и R_2 при ϑ_2^0 C.

Для металлов в качестве ϑ_1 берут комнатную температуру, а температуру ϑ_2 получают нагреванием в подогреваемой электричеством

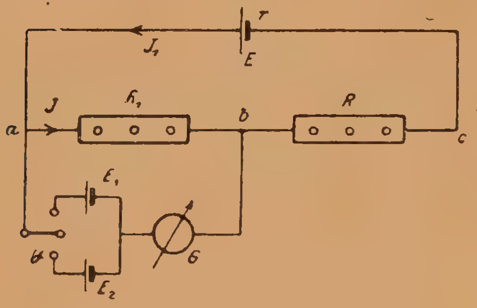
масляной ванне. Это измерение, по возможности, производят для большого числа различных значений температуры почти до $100^0\,C$; затем графически изображают R_2 как функцию ϑ_2 вычисляют по нескольким точкам выравненной кривой $f\,(R_2,\ \vartheta_2)$ значения α и выводят из них среднее значение для исследуемого температурного промежутка $\vartheta_1 \div \vartheta_2$.

---

25. Сравнение эл.-дв. сил посредством компенсации.

(Дю Буа Реймон)

Схема включения показана на фиг. 69. Здесь E постоянный источник вспомогательного тока J, служащего для получения компенсирующего напряжения. E_1 и E_2, сравниваемые между собой, эл.-дв. силы; они, одна после другой сравниваются с E.



Фиг. 69.

Пусть R_1 и R_1' сопротивления, включенные в ветвь ab, а R и соответственно R' в bc, тогда можем составить уравнения:

$$\text{I.}\quad \frac{E}{E_1} = \frac{R_1 + R + r}{R_1}$$

$$\text{II.}\quad \frac{E}{E_2} = \frac{R'_1 + R' + r}{R'_1}\ .$$

Отсюда следует $$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R'_1 + R' + r}{R_1 + R + r} \cdot \frac{R_1}{R'_1}\ .$$

Если мы будем сохранять постоянным сопротивление $R_1 + R = R'_1 + R'$, то остается

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_1}{R'_1}\ .$$

Эта схема является основой широкоприменяемого в технике компенсационного аппарата.

---

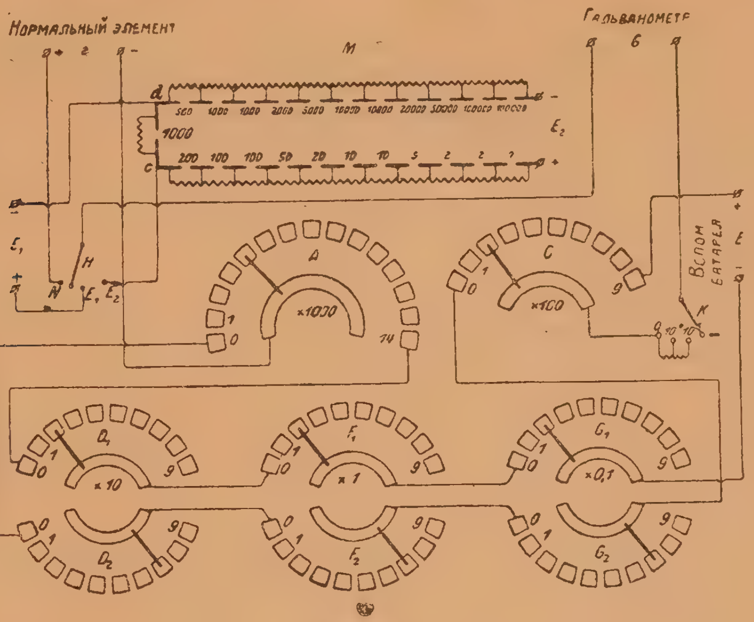
26. Измерения компенсационным аппаратом.

а) Постоянный ток.

Первый практически применимый аппарат этого рода построил К. Фейснер (K. Feussner [1]). После некоторых улучшений этот аппарат получил ту форму, в которой его изготовляет фирма O. Wolff Berlin W., по схеме показанной на фиг. 70, для напряжения до 600 вольт.

Чтобы изучить способ применения аппарата, воспользуемся упрощенной схемой (фиг. 71). Если нужно измерить напряжение меньше 1,5 вольт, то их приключают к клеммам E_1. Затем включают вспомогательную батарею E, ставят рычаг H на E_1 и K на 100 000 и до тех пор регулируют реостаты $ACDGF$ пока гальванометр не покажет отсутствие отклонения. Тогда K передвигают к контакту O, чем выключают балластное сопротивление. Это последнее служит только для

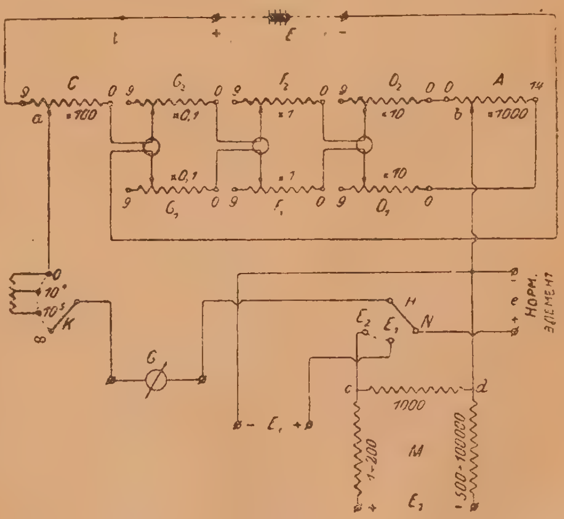
того, чтобы избежать слишком сильной нагрузки элемента при первоначальном выравнивании. Появляющиеся небольшие отклонения гальванометра устраняют, регулируя более точно сопротивления. При этом в реостатах C, G_2, F_2, D_2, A, между $a \div b$ включено сопротивление



Фиг. 70.

R_1 Ω. При чем G_1, F_1, D_1 не отсчитываются, так как они лежат вне ветви $a \div b$ и только дополняют собой G_2, F_2, D_2 до 99,9 Ω, для того чтобы сопротивление R_0 всей цепи вспомогательной батареи E оставалось все время постоянным. Затем переводят рычаг K назад на контакт 100 000 и H на N и компенсируют таким же образом эл. дв. силу нормального элемента e с помощью сопротивления R_2. На основании этих измерений получаем следующие соотношения:

1. $E_1 = J \cdot R_1$
2. $E = J \cdot R_0$
3. $e = J \cdot R_2$.



Фиг. 71.

из 1-го и 2-го следует:

$$4. \quad \frac{E_1}{E} = \frac{R_1}{R_0},$$

из 2-го и 3-го следует:

$$5. \quad \frac{e}{E} = \frac{R_2}{R_0}.$$

Делением уравнения 4-го на 5-ое получаем

$$\frac{E_1}{e} = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{или} \quad E_1 = \frac{R_1}{R_2} \cdot e .$$

Если измеряемая эл. дв. сила больше чем 1,5 вольт $= E_2$, то она включается на сопротивление M. Пусть при этом для устранения отклонения гальванометра между $a \div b$ включено сопротивление R_3 и в M сопротивление R_1 (в том числе и 1000 Ω между $c \div d$); тогда в точках $c \div d$ имеем компенсируемое напряжение

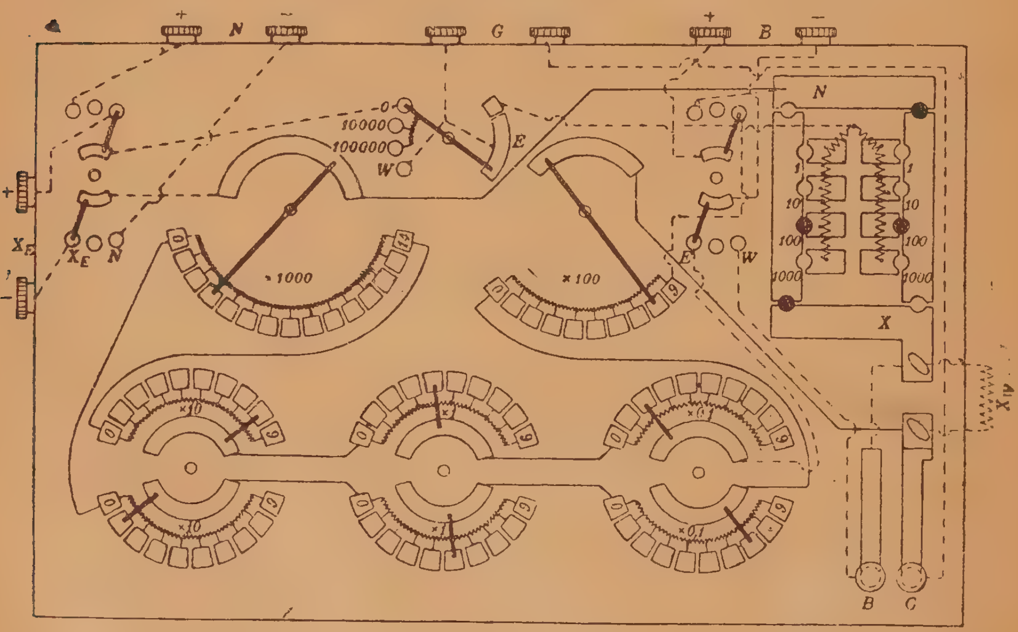
$$E'_2 = E_2 \frac{1000}{R_4} .$$

Следовательно в предшествующих формулах нужно подставить E'_2 вместо E_1, и R_3 вместо R_1, что даст

$$E'_2 = E_2 \cdot \frac{1000}{R_4} = \frac{R_3}{R_2} \cdot e$$

$$\text{или} \quad E_2 = \frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{R_4}{1000} \cdot e$$

Схема новой модели, аппарата[2]) изображена на фиг. 72. Здесь имеются два ответвления с сопротивлениями 2 × 1; 10; 100; 1000 Ω;



Фиг. 72.

их легко поменять местами, переставив для этого два штепселя. Благодаря такому приспособлению компенсатором можно одновременно пользоваться и как мостиком Уитстона, кроме того у переключателя к гальванометру на один контакт (10000 Ω) больше, так как

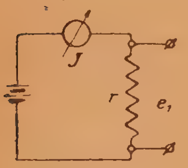
интервал 100000 ÷ 0 слишком велик для гальванометров с малым сопротивлением; а эти последние именно и удобно применять при измерении.

Для сравнения малых эл. дв. сил и в особенности для исследования нормальных элементов Вольф [3]) построил компенсатор, с сопротивлением только 15000 Ω.

Однако, вследствие существования термоэлектрических сил и малой чувствительности гальванометров с большим сопротивлением, этот компенсатор и ему подобные не удобны для измерения малых напряжений, например, у термоэлементов, электрических термометров, при определении теплопроводности металлов и т. п. Взяв за основу компенсатор Рапса (Raps) [4]), использовав результаты работ Хаусрата (Hausrath) [5]), а также применив предложенную Уайтом [6]) „шунтовую декаду“ Диссельхорст [7]) построил аппарат, свободный от термосил с постоянным малым сопротивлением.

Подробное описание компенсационных аппаратов и вспомогательных приспособлений к ним дали Хаусрат и Крюгер [8]). Из других следует упомянуть еще аппараты Тирмана [9]), Франке [10]) и Wilsmore'a [11]).

Кроме измерения эл. дв. сил с помощью компенсатора можно градуировать вольтметры. Для этой цели их приключают к компенсируемому напряжению E_1 или E_2 (фиг. 71). Для измерения силы тока или для градуирования амперметров, соответствующий ток пропускают через прецизионное сопротивление r, (фиг. 73) модели принятой *PTR*, и концы последнего соединяют с E_1. Если при этом на концах сопротивления r окажется разность потенциалов e_1, то ток будет



Фиг. 73.

$$J = \frac{e_1}{r} .$$

Чтобы измерить сопротивление R, его включают последовательно с прецизионным сопротивлением r к подходящему источнику тока. Если затем измерено напряжение e_1 на r и E на R, то

$$R = \frac{E}{e_1} \cdot r .$$

Егер [12]) произвел обстоятельное исследование, относительно чувствительности этого метода по сравнению с мостиком Уитстона, и дифференциальным гальванометром.

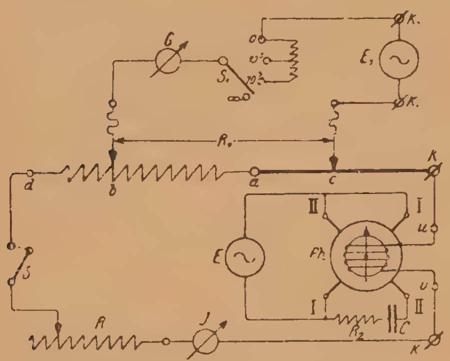
Для тех случаев, когда нужно проверить вольт-и амперметр ходового типа, не прибегая к сложным измерениям, фирма Europäische Weston-Gesellschaft изготовляет технический компенсационный аппарат [13]), в него входит как часть вольт-амперметр, показания которого, при посредстве прецизионного сопротивления, сравниваются посредством компенсации с нормальным элементом и приводятся к истиной шкале с помощью магнитного шунта, заключенного в вольт-амперметре. С показаниями этого прибора затем сверяют испытуемые приборы. Эл. дв. силой нормального элемента Weston'a [14]) согласно данным Кале (Kahle) [15]), считали $E = 1{,}0186 - 3{,}8 . 10^{-5} . (\vartheta - 20) - 6{,}5 . 10^{-7} . (\vartheta - 20)^2$, по новым же определениям международной конференции в Лондоне в 1908 г., принято как международное значение эл. дв. силы $E = 1{,}0183\ V$ при 20° C [16]).

Новые исследования Егера[17]), Смита[18], Роза и Виналя[19]) дали несколько другое значение (1,01827).

Для нового элемента, составленного согласно пункту C постановлений международной конференции 1908 г. в Лондоне, по исследованиям Вольфа $E = 1{,}0184 - 4{,}06 \cdot 10^{-5} \cdot (\vartheta - 20) - 9{,}5 \cdot 10^{-7} \cdot (\vartheta - 20)^2$.

b) Переменный ток.

Схема включения, применяемого для измерения напряжений переменного тока по величине и фазе дана на фиг. 74.



Фиг. 74.

Измеряемое напряжение E_1 включают к клеммам K_1, которые соединены через ключ S_1 и гальванометр переменного тока G с двумя подвижными контактами потенциометра $K\,a\,d$. Этот последний состоит из соединенных последовательно измерительной проволоки $K\,a$ и безиндукционного прецизионного сопротивления $a\,d$. Потенциометр получает ток, изменяемый по величине и фазе, от вторичных клемм uv регулятора фаз Ph через амперметр J и регулируемое сопротивление. Вспомогательный источник тока E питает регулятор фаз. Этот последний имеет двухфазную обмотку, II-ая фаза которой включена через безиндукционное[20]) сопротивление R_2, соединенное последовательно или параллельно с конденсатором C. Эта фаза служит для получения сдвинутого по фазе тока, требующегося для образования вращающегося поля (так называемая искусственная фаза)[21]).

Теперь если установить скользящие контакты b и c, а также и фазу тока J так, что гальванометр G покажет отсутствие отклонения, то

$$E_1 = I \cdot R_1,$$

где R_1 обозначает сопротивление между скользящими контактами.

С помощью включения фиг. 73 можно, пользуясь известным безиндукционным сопротивлением r, измерить также силу тока и мощность, так как фазовый угол можно определить по положению регулятора фаз. При малых фазовых углах (до 1^0) применяют метод Шеринга (Schering) и Альберти (Alberti)[22]) или установку Дегина (Déguisne)[23]).

Другой метод для измерения напряжений переменного тока Ларсен (Larsen)[24]) применил для устройства своего комплексного компенсатора. Соответственно комплексной форме напряжения переменного тока, которое определяется как состоящее из действительной и мнимой составляющей, или при графическом изображении, из составляющей сдвинутой на 90^0 по отношению к действительной. Действительная составляющая компенсируется напряжением на безиндукционном сопротивлении, мнимая же составляющая эл. дв. силой катушки взаимоиндукции включенной последовательно с этим сопротивлением. В особом случае последовательного включения конденсатора

без потерь с катушкой взаимоиндукции этот метод может служить для измерения числа периодов переменного тока.

Оба вида компенсационного измерения подробно описаны Барбаджелата (Barbagelata) и Эмануэли (Emanueli) в журнале[25]) международного конгресса по электротехнике в Турине 1911, там же ими разобрана теория этих методов, а также теория различных гальванометров переменного тока. Подобного же типа компенсатор (потенциометр) по указаниям Драйсдэл (Drysdále)[26]) изготовляет фирма Tinsley Co London.

В качестве измерительного прибора в компенсируемой ветви, кроме обычно применяемого телефона, можно пользоваться еще предложенным Фрэлихом[27]) и улучшенным М. Вином[28]) оптическим телефоном. В нем магнитные действия переменного тока вызывают попереч ные колебания мембраны, которые делаются видимыми благодаря зеркалу и лучу света. Обращение с этим прибором относительно хлопотливо.

Более удобный прибор — вибрационный гальванометр Рубенса[29]). Он состоит из стальной струны. толщиной 0,1 ÷ 0,3 *mm*, туго натянутой на вертикальной рамке. В середине эта струна несет колебательную систему, состоящую из 20 железных проволочек длиной 6 ÷ 8 *mm*, толщиной 0,35 *mm*, подвешенных одна над другой. Для намагничивания этих иголок служат два подковообразных магнита, одноименные полюса которых расположены один подле другого. На полюсные наконечники, сделанные из мягкого железа, надето по катушке обтекаемой переменным током. Влияние тока в катушках будет попеременно ослаблять одну пару полюсов магнитов и усиливать другую, благодаря чему появятся колебания у струны и связанного с нею зеркала; амплитуда этих колебаний может служить мерою силы тока.

Перед употреблением прибор должен быть настроен на резонанс собственных колебаний с частотой переменного тока посредством соответствующей натяжки струны. При этом прибор имеет ценное свойство отзываться только на одну частоту. Благодаря этому при несинусоидальной форме переменного тока он не покажет высших гармонических, если настроен на основную волну. Прибор этот пригоден для частоты приблизительно от 50 до 500 пер/сек. Для высоких частот приблизительно до 4.000 пользуются конструкцией, предложенной М. Вином[30]), с иглами длиной 3 *mm.*, подвешенными в щели круглого электромагнита, составленного из тонких железных проволочек. Колебания становятся видимыми в виде изображения ярко освещенной щели, растягивающейся в светлую полоску. 1 *mm.* расширения изображения при 1 *mm.* расстояния щели от экрана отвечает приблизительно току $3 \cdot 10^{-7}$ амп. при 500 и $6 \cdot 10^{-5}$ амп. при 4.000 пер/сек. Кампбэл (Campbell)[31]) предложил прибор с бифилярной системой.

Шеринг и Шмидт[32]) дали прибору новую форму, настройка в которой на определенную частоту достигается электромагнитным путем, посредством изменения сопротивления. Чувствительность этой модели около 10^{-7} амп. при частоте до 160 пер/сек.

Грейнахер (Greinacher)[33]) описал вибрационный электрометр по системе Вульфа и указал способ его применения в мостике переменного тока; для того же измерения Куртис[34]) берет за основание квадрантный электрометр. Наконец можно употреблять осцилографы [Блонделя, Дудделя[35]), Simens & Halske[36])] с магнитной иглой или бифилярной системой: при этом они не должны быть демпфированы

маслом и их собственная частота должна быть равной частоте применяемого переменного тока.

---

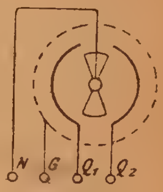
1) ZfI 113 (1890) ETZ 187 (1911). 2) ZfI. 301 (1903); ETZ. 215 (1911).
3) ZfI. 227 (1901). 4) ETZ. 507 (1895): ZfI. 215 (1895).
5) Ann. d. Phys. 735 (1905); ZfI. 353 (1905) (рефер).
6) ZfI. 210 (1907) 7) ZfI. 297 (1906); 1 (1908).
8) Helios 429, 437, 445, 453, (1909).
9) ETZ. 387 (1895); 871 (1901).
10) ETZ. 318 (1897); 978 (1903); 1175 (1913). 11) ETZ. 997 (1901).
12) ZfI. 69 (1906). 13) El. u. M. Wien. (39) (1907); Druckschrift (104).
14) Ann. d. Phys. (5) 1—50 (1901). 15) ZfI. 229, 297 (1899).
16) ETZ. 1303 (1910). 17) Ann. d. Phys. 726 (1904).
18) Phil. Tr. Roy. Soc. London 393, 463 (1908).
19) ETZ. 232, 1168 (1913); 789 (1914). 20) ETZ. 721 (1912).
21) Linker, Der Einphasenmotor II Abschnitt.
22) AfE. 263 (1914). 23) AfE 303 (1917); ETZ. 416 (1919).
24) ETZ. 1039 (1910). 25) I metodi di opposizione colle correnti alternate, Turin, Vincenzo Bona (1912). 26) El. (75) 157; ETZ. 656 (1916).
27) ETZ. 65 (1889). 28) Wied. Ann. N. F. 593, 681, (1891).
29) Wied. Ann. 27. (1895); ETZ. 111 (1896). 30) Ann. d. Ph. 439 (1901).
31) Phil. Mag. 494 (1907). 32) ZfI. 1 (1918); ETZ. 410 (1918).
33) ETZ. 1485 (1913); AfE. (11) (1913).
34) Bull. Bur. Stand. (11) 535; ETZ. 460 (1916).
35) El. (39) 636 (1897). 36) Druckschrift (126).

---

27. Измерения посредством электрометра.

Из различных конструкций для технических измерений удобнее всего квадрантные электрометры по Томсону, Гальваксу (Hallwachs) и Шульце[1]. Квадрантный электрометр состоит из четырех, тщательно друг от друга изолированных частей: четырех квадрантов, т.-е. четырех частей плоской цилиндрической коробки, разрезанной двумя взаимно перпендикулярными щелями; бисквитообразной стрелки, свободно подвешенной в этой коробке и наконец футляра, защищающего всю систему от внешних электростатических влияний. Каждые два противолежащие квадранта соединены между собой проводником. Каждая пара квадрантов, стрелка и футляр снабжены клеммами.

Схематически прибор изображен на фиг. 75. Силовое воздействие сторон квадрантов на стрелку компенсируется направляющей силой бифилярного подвеса или кручением тонкой металлической нити (проволока Волластона)[2]. Прибор чувствителен, однако измерения отнюдь не абсолютны, так как с вращением стрелки изменяется постоянная прибора. Поэтому к электрометру нужна градуировочная кривая, которую определяют путем сравнения с нормальным элементом.



Фиг. 75.

По Максвеллу, зависимость отклонений α (измеренных в долях шкалы) от потенциалов E_1 и E_2 обоих квадрантов и N стрелки, выражается уравнением

$$\alpha = c \cdot (E_1 - E_2) \cdot \left(N - \frac{E_1 + E_2}{2}\right).$$

В этом уравнении конечно не учитывается влияние контактных потенциалов прибора. По Галльваксу [3]), вызываемая этим влиянием ошибка сводится к незначительной величине, если соблюдено следующее условие: стрелка должна стоять симметрично по отношению

к обоим квадрантам. Для испытания соединяют обе пары квадрантов с землей, заряжают стрелку до любого подходящего потенциала и добиваются, изменяя высоту подвеса стрелки, наименьшего отклонения. Затем вращают крутильную головку подвеса стрелки до тех пор, пока при перемене знака заряда иглы не будут получаться равные отклонения в противоположные стороны. Кроме того, перед началом измерения прибор должен долго стоять наэлектризованным, для того, чтобы заряд распределился также и на изолирующих подставках, в противном случае трудно получить определенное нулевое положение.

По новым исследованиям Орлиха[4]), при которых было устранено влияние контактного потенциала, общее уравнение электрометра будет

$$\begin{aligned} D \cdot \alpha = a_0 \cdot N^2 &+ a_1 \cdot E_1^2 + a^2 \cdot E_2^2 \\ &+ b_0 \cdot E_1 \cdot E_2 + b_1 \cdot N \cdot E_1 + b_2 \cdot N \cdot E_2 \\ &+ c_0 \cdot N + c_1 \cdot N_1 + c_2 \cdot E_2 \quad . \end{aligned}$$

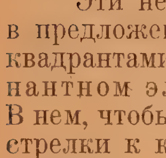
Здесь N, E_1, E_2 потенциалы стрелки и квадрантов по отношению к футляру; a, b, c постоянные, которые по Орлиху, определяются из опыта и удовлетворяют условию

$$a_1 - a_2 = -b_1 = b_2, \quad c_1 = -c_2;$$

а

$$D = 1 + u \cdot (N - E_1) \cdot (N - E_2) + v \cdot (E_1 - E_2)^2$$

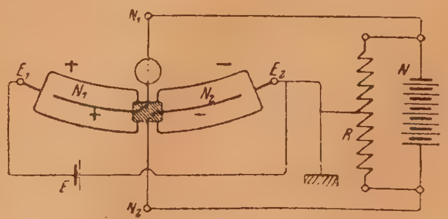
представляет собой направляющую силу системы. По исследованиям Шульце[5]), соответствующей регулировкой можно свести к нулю u и также v. Если производить четыре отсчета, взаимно переключая потенциалы стрелки и квадрантов, то нет необходимости соблюдать условие Галльвакса.



Фиг. 76.

При измерении быстро изменяющихся напряжений, нельзя взаимно переключать, контакты прибора почему приходится работать при непропорциональной шкале. Кроме того, при малых зарядных напряжениях (N) стрелки, вследствие большой непропорциональности, отклонения практически неприменимы. Чувствительность прибора изменяется в широких границах, однако, не посредством изменения зарядного напряжения, а только с помощью смены нитей подвеса.

Эти недостатки были устранены впервые М. Кюри (M. Curie)[6]) в предложенном ей электрометре со стрелкой из двух частей и двумя квадрантами, в так называемом бинантном электрометре (фиг. 76). В нем, чтобы избежать приближения стрелки к квадрантам при высоких зарядах N, стрелка и квадранты сконструированы в виде полых концентрических шаровых поверхностей.



Фиг. 77.

Схема наиболее употребительного включения (квадрантное включение) изображена на фиг. 77. Для этого включения пропорциональность без переключения определится из уравнения

$$\alpha = c \cdot (N_1 - N_2) \cdot (E_1 - E_2) \ .$$

Если посредством заземления середины источника заряда иглы получено $N_2 = -N_1 = \frac{N}{2}$ и имеется $E = E_1 - E_2$ измеряемое напряжение, то получится

$$\alpha = c \cdot N \cdot E \, .$$

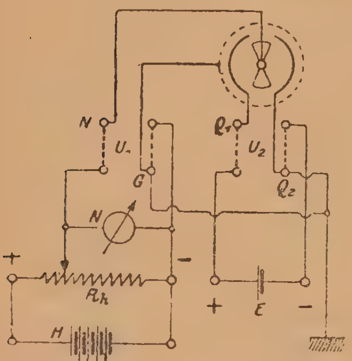
Если же нельзя заземлить середину заряжающего источника, то параллельно ему включают сопротивление R (около $10^5 \div 10^7\ \Omega$) и заземляют середину этого сопротивления.

Контактный потенциал в приборе устранен, благодаря изготовлению стрелки и квадрантов из одного куска аллюминия. Чувствительность при той же емкости прибора при заряде стрелки свыше 200 вольт выше, чем у обыкновенного электрометра. Инструмент позволяет измерить по отклонению стрелки от нескольких милливольт до 100 вольт, так как пропорциональность сохраняется вплоть до самых малых зарядов стрелки. Прибор изготовляет, по указанием Долезалека[7]) фирма G. Bartels Götlingen.

В зависимости от цели измерения для квадрантного электрометра различают включения квадрантное, на стрелку, и двойное.

a) Включение на квадранты.

Оно употребляется для измерения малых разностей потенциалов E, которые включают, по схеме фиг. 78, к квадрантам Q_1 Q_2. Стрелку заряжают до постоянного высокого потенциала N (от 100 до 150 вольт) через делитель напряжения Rh (около 300000 Ω) от вспомогательной батареи H (столб Замбони, аккумуляторы или сухие элементы, всего около 300 вольт). Q_2 и футляр G можно заземлить. Чтобы проградуировать прибор для измерения напряжений, к квадрантам вместо E приключают нормальный элемент e (Вестон: 1,0183 вольт при 20^0 C; Кларк: 1,4328 вольт при 15^0 C) и определяют для четырех положений переключателей U_1 и U_2 соответствующие отклонения $\alpha_1 \div \alpha_4$. В этом случае, так как $E_2 = 0$, $E_1 = \pm e$ имеют место для различных положений переключателей следующие соотношения:



Фиг. 78.

U_1	U_2	Уравнения
		$D \cdot \alpha_1 = a_0 \cdot N^2 + a_1 \cdot e^2 + b_1 \cdot N \cdot e + c_0 \cdot N + c_1 \cdot e$
		$D \cdot \alpha_2 = a_0 \cdot N^2 + a_1 \cdot e^2 - b_1 \cdot N \cdot e - c_0 \cdot N + c_1 \cdot e$
		$D \cdot \alpha_3 = a_0 \cdot N^2 + a_1 \cdot e^2 + b_1 \cdot N \cdot e - c_0 \cdot N - c_1 \cdot e$
		$D \cdot \alpha_4 = a_0 \cdot N^2 + a_1 \cdot e^2 - b_1 \cdot N \cdot e + c_0 \cdot N - c_1 \cdot e$

На основании того, что

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_4) ,$$

получим
$$\alpha = \frac{2b_1}{D} \cdot N \cdot e$$

или
$$\alpha = \frac{1}{c_q} \cdot N \cdot e ,$$

где
$$c_q = \frac{D}{2b_1}$$

называется постоянной электрометра для квадрантного включения. Согласно опытам Шульце коэффициент c_q для напряжений почти до 500 вольт изменяется по уравнению

$$c_q = c \cdot (1 + u \cdot N^2) ,$$

т.-е.
$$D = 1 + u \cdot N^2 .$$
Если определить зависимость α от различных напряжений e, которые можно измерить компенсационным методом или с помощью нормального элемента и делителя напряжения, то, изобразив графически эту зависимость, получим градуировочную кривую $f(\alpha, e)$ для данного электрометра. Постоянная c_q может быть определена так же, как c и u, из двух измерений при двух различных известных потенциалах N стрелки и при одном и том же значении e.

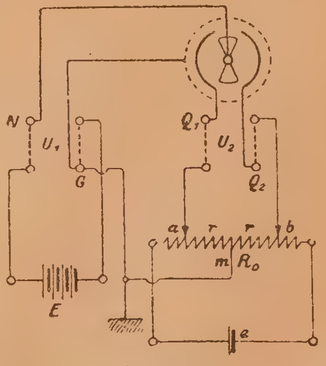
Если градуировочная кривая, при $N = const$, будет прямой линией, то, заменив e измеряемым напряжением E, при угле отклонения β получим

$$E = \frac{\beta}{\alpha} \cdot e .$$

Для испытания постоянства потенциала N стрелки можно применять маленький вспомогательный электрометр или вольтметр. При частых измерениях электрометром удобнее проградуировать отклонения стрелки прямо в вольтах, чтобы избежать пересчетов.

При сравнении более высоких потенциалов квадрантное включение даст слишком большие отклонения, почему в этом случае применяют обратное включение, а именно:

в) Включение на стрелку.



Фиг. 79.

Схему включения даст фиг. 79. Исследуемый источник тока E относительно высокого напряжения приключают к стрелке и футляру, и последний включают на землю. Квадранты соединяют с двумя точками a и b большого сопротивления R_0 ($> 100.000\ \Omega$), включенного к источнику тока известного напряжения или к нормальному элементу e таким образом, чтобы между точкой заземления m и точками a, b лежали равные сопротивления r, затем производят опять четыре

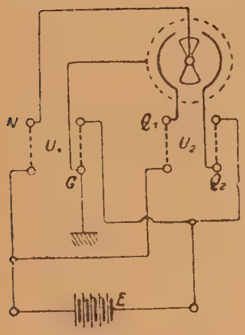
отсчета, переключая U_1 и U_2, что определит разность потенциалов между Q_1 и Q_2, именно

$$E_1 - E_2 = E_q = e \cdot \frac{2r}{R_0}$$

подставив $b_2 = -b_1$ и $c_2 = -c_1$, получим:

$$\alpha = \frac{2b_1}{D} \cdot E \cdot E_q \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{1}{c_n} \cdot E \cdot E_q ,$$

где $c_n = c_q$ и $D = 1 + (4v - u) \cdot E_q{}^2$. Градуирование и в этом случае можно произвести с помощью источника тока с известным напряжением.



Фиг. 80.

Оба вышеописанные включения называют гетеростатическими, так как при них нужен еще независимый источник тока. Если хотят избавиться от этого неудобства, то применяют

c) Двойное включение

или идиостатическое, схема которого показана на фиг. 80. Одну пару квадрантов (Q_1) включают вместе со стрелкой к одному полюсу источника тока, а другую пару (Q_2) и футляр (G) к другому полюсу. Футляр, кроме того соединяется с землей.

Для этого случая будем иметь уравнения:

U_1	U_2	$D.\alpha =$
: :	: :	$a_0 \cdot E^2 + a_1 \cdot E^2 + 0 + b_1 \cdot E^2 + 0 + c_0 \cdot E + c_1 \cdot E + 0$
::::	: :	$a_0 \cdot E^2 + 0 + a_2 \cdot E^2 + 0 + b_2 \cdot E^2 - c_0 \cdot E + 0 - c_2 \cdot E$
::::	::::	$a_0 \cdot E^2 + a_1 \cdot E^2 + 0 + b_1 \cdot E^2 + 0 - c_0 \cdot E - c_1 \cdot E + 0$
: :	::::	$a_0 \cdot E^2 + 0 + a_2 \cdot E^2 + 0 + b_2 \cdot E^2 + c_0 \cdot E + 0 + c_2 \cdot E.$

Отсюда следует

$$D \cdot \alpha = (a_1 - a_2 + b_1 - b_2) \cdot E^2 = b_1 \cdot E^2 \text{ так как } a_1 - a_2 = b,$$

$$\text{или} \quad \alpha = \frac{b_1}{D} . E^2 = \frac{1}{c_d} . E^2 ,$$

где $c_d = \frac{D}{b_1}$ обозначает постоянную двойного включения. Далее $D = 1 + v . E^2$ несколько зависит от E. Для градуирования пользуются постоянным напряжением E от аккумуляторной батареи и сопротивлением для деления напряжения в любых отношениях; затем определяют

отклонения α соответствующие различным напряжениям и строят градуировочную кривую $f(E, \alpha)$.

Вспомогательные приборы, необходимые при измерениях с электрометром (как-то переключатели, ключи и т. д.), конечно должны быть также тщательно изолированы, как и квадранты прибора, в противном случае в результат легко может вкрасться ошибка.

Приборы очень высокой чувствительности описали Гофман (Hoffman)[8]) чувствительности и Мёлли (Mully)[9]).

d) Измерения при переменном токе.

Пригодность электрометра для измерений переменного тока, с постоянными найденными при постоянном токе, твердо установлена подробными опытами[10]) произведенными Орлихом. Электрометром можно с удобством измерять напряжение и мощность. В этом случае в общие уравнения электрометра нужно вместо постоянных величин, входящих при постоянном токе, подставить средние значения.

1. Измерение напряжений переменного тока. В этом случае применяют двойное включение, для которого имеем соотношение:

$$\alpha = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \alpha t . dt = \frac{1}{c_d} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E_t^2 \cdot dt = \frac{1}{c_d} \cdot E^2$$

где E обозначает величину измеряемого напряжения переменного тока. Так как линейные члены выпадают, благодаря тому что среднее значение $\frac{1}{T} \cdot \int_0^T E_t \cdot dt = 0$, то в данном случае нужно произвести только два отсчета, по которым получится

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 = \alpha_3 - \alpha_2 = \alpha_3 - \alpha_4 = \alpha_1 - \alpha_4 \, .$$

Тогда

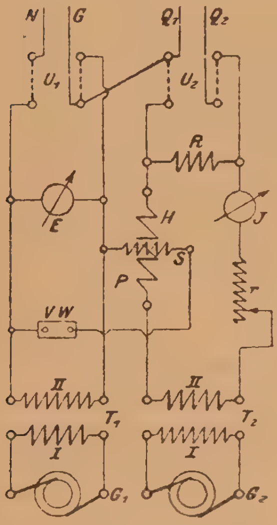
$$E^2 = \frac{D}{b_1} \cdot \alpha \, .$$

Если прибор не выверен по правилам Шульце, то определяют постоянную $c_d = \frac{D}{b_1}$ для ряда напряжений и строят графически ее в виде функции от α.

Для напряжений свыше 200 вольт пользуются делителем напряжения с заземленной одной точкой. Для того, чтобы иметь возможность точно вычислить часть напряжения, действующую на стрелку, следует, особенно при очень больших сопротивлениях (из-за влияния емкости), заземлять, то-есть соединять с футляром, только конец сопротивления, а от разветления брать провод к стрелке. Второе отклонение получают, переключая U_2; U_1 переключать нельзя.

Практически применимый делитель напряжения до 1200 вольт, без емкостной реакции предложили Орлих и Шульце[11]. Баксманн (Baxmann)[12] доводит, с помощью конденсаторов, деление напряжения до 75000 вольт.

Если же, вследствие недостаточной изоляции или иных условий работы, нельзя заземлить один полюс высокого напряжения, то параллельно делителю напряжения включают заземленное в середине вспомогательное сопротивление R_c, а не заземленный футляр G соединяют с серединой c делителя напряжения R_0, как это показано в цепи напряжения на фигуре 82.


Фиг. 81

Также можно сравнить напряжение E_w переменного тока с напряжением E_g постоянного тока посредством дифференциального включения, по Дреуэллю (Drewell)[13]. Стрелку соединяют с футляром и включают E_w между футляром и Q_1, отклонение компенсируют посредством напряжения E_g постоянного тока, включенного между G и Q_2. Затем взаимно переключают полюса напряжения постоянного тока и вновь приводят стрелку к нулевому положению при другом значении напряжения E_g. В обоих случаях проверяют место нуля при обоих положениях переключателя U_2.

Так как константы выпадут, то останется

$$E_w{}^2 = E_{g1} \cdot E_{g2}.$$

Орлих[14] предложил переключатель специально приспособленный для этого измерения.

2. Измерение мощности переменных токов. В этом случае пользуются квадрантным включением электрометра. Если хотят проверить уаттметр или счетчик с помощью искусственной нагрузки, т.-е. с разделенными цепями тока и напряжения, то применяют включение по схеме фиг. 81.

Клеммы G и Q_1 соединяют между собой, стрелку включают к обмотке II высокого напряжения трансформатора T_1, параллельно катушке напряжения S уаттметра P. Катушку тока H включают, вместе с без'индукционным сопротивлением R, амперметром J и регулировочным сопротивлением r, к обмотке II низкого напряжения трансформатора T_2. Трансформаторы присоединены к зажимам двойного генератора[15] G_1 и G_2, у этого генератора статор G_2 может быть повернут по отношению к G_1, сделано это для того, чтобы изменять фазу тока J по отношению к напряжению E.

При больших силах тока свыше 1.000 амп. вспомогательное сопротивление R должно быть по возможности совершенно свободно от самоиндукции.

Удобные конструкции предложили Лихтенштейн[16] и по тому же принципу Кэмпбелл[17] и наконец Орлих[18]. Петерсон (Paterson) и Райнер (Rayner)[19] применяют для силы тока почти до 2.000 амп. охлаждаемые водой трубы манганина с отдельными проводами для измерения потенциала; для более сильных токов в особой конструкции PTR[20] индуктивное влияние компенсируется маленькой вспомогательной катушкой в цепи напряжения.

При начерченных сплошной линией положениях переключателей U_1 и U_2 получают отклонение

$$D \cdot \alpha_1 = a_0 \cdot M(E_t^2) + a_2 \cdot M(J_t^2 \cdot R^2) + b_2 \cdot M(E_t \cdot J_t \cdot R).$$

Если переключить U_2 то

$$D_1 \cdot \alpha_2 = a_0 \cdot M(E_t^2) + a_2 \cdot M(J_t^2 \cdot R^2) - b_2 \cdot M(E_t \cdot J_t \cdot R).$$

Отсюда следует

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \alpha = \frac{2b_2}{D} \cdot R \cdot M(E_t \cdot J_t).$$

Подставив сюда для среднего значения

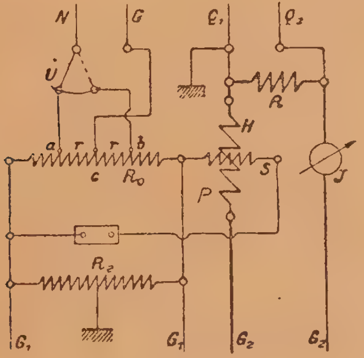
$M(E_t \cdot J_t) = \frac{1}{T}\int\limits_0^T E_t \cdot J_t \cdot dt$ значение мощности P получим:

$$\alpha = \frac{R}{c_q} \cdot P\,,$$

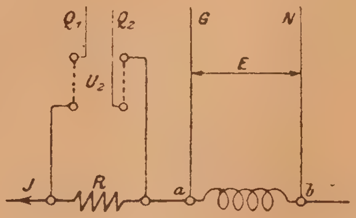
или

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{c_q}}{\mathrm{R}} \cdot \alpha\,.$$

Здесь c_q определяется с помощью постоянного тока. При высоких напряжениях пользуются включением, изображенным на схеме фиг. 82: В этом случае заземляют Q_1, а незаземленный футляр (G) соединяют с серединой c делителя напряжения R_0. Параллельно R_0 включают большое вспомогательное сопротивление R_e, середину которого заземляют. Стрелку включают к подвижным, по отношению к c, точкам a и b сопротивления r.



Фиг. 82



Фиг. 83

Отклонения α_1 и α_2 получают посредством перевода одного лишь переключателя U. Тогда имеем отношение

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{c_q}}{\mathrm{R}} \cdot \frac{\mathrm{R_0}}{\mathrm{r}} \cdot \alpha\,.$$

Чтобы измерить мощность, отданную в нагрузке ($a \div b$), применяют при низком напряжении включение по схеме фиг. 83.

Вспомогательное сопротивление R безиндукционно, поэтому, для обоих положений единственного переключателя U_2 получают отношения:

$$D \cdot \alpha_1 = a_0 M(E_t^2) + a_1 \cdot M(J_t^2 \cdot R^2) + 0 + b_1 \cdot M(E_t \cdot J_t \cdot R) + 0$$
$$D \cdot \alpha_2 = a_0 \cdot M(E_t^2) + 0 + a^2 \cdot M(J_t^2 \cdot R^2) + 0 - b_2 \cdot M(E_t \cdot J_t \cdot R).$$

Отсюда следует:

$$D \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) = D \cdot \alpha = (a_1 - a_2) \cdot M\,(J_t^2 \cdot R^2) + R \cdot (b_2 - b_1) \cdot M(E_t \cdot J_t),$$

или

$$\alpha \cdot \frac{D}{R} = (a_1 - a_2) \cdot J^2 \cdot R + (b_2 - b_1) \cdot P = b_2 \cdot J^2 \cdot R + 2b_2 \cdot P\,.$$

Истинная мощность между $a \div b$ поэтому определится из уравнения

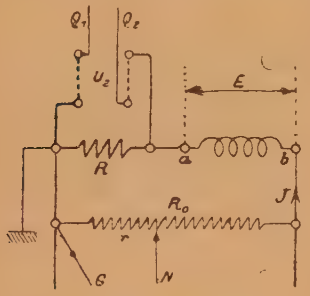
$$P = \frac{D}{2b_2} \cdot \frac{\alpha}{R} - \frac{1}{2} \cdot J^2 \cdot R\,,$$

или

$$\mathbf{P} = \mathbf{c} \cdot \frac{\alpha}{\mathbf{R}} - \frac{1}{2} \cdot \mathbf{J}^2 \cdot \mathbf{R}$$

В большинстве случаев можно пренебречь членом $\frac{1}{2} J^2 \cdot R$.

При высоком напряжении G и N, по схеме фиг. 84, приключают не прямо к $a \div b$, но к делителю напряжения R_0.



Фиг. 84

Тогда

$$P = \frac{R_0}{r} \cdot c \cdot \alpha + \frac{R_0 - 2r}{2r} \cdot J^2 \cdot R.$$

Однако это измерение, при напряжениях E ниже 10 вольт обладает точностью не свыше $1^0/_{00}$.

Райнер (Rayner)[21]) применил это включение для измерения потерь энергии в изолирующих материалах.

Некоторые примеры, которые обнимают почти все виды применения электрометра для измерений переменного тока, в том числе и для сравнения фазовых углов сопротивлений при высокой частоте (5.000 пер./сек.), дал так же Орлих[22]).

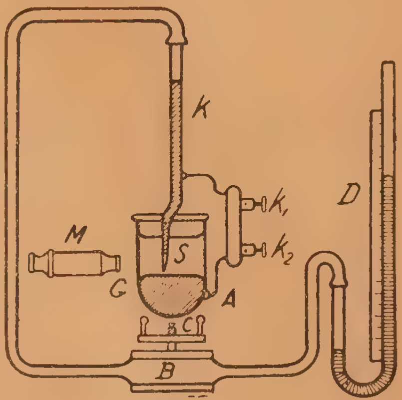
Мощность можно определить также и по нулевому методу[23]), для чего пользуются вспомогательным напряжением постоянного тока для компенсации и кроме того нормальным элементом. Произведение двух компенсирующих напряжений, полученных посредством переключения и эл. дв. силы нормального элемента и будет мерой мощности переменного тока.

По Пейкерту (Peukert)[24]), можно использовать гальванометр с подвижной катушкой в качестве электрометра, включив для этого подвижную рамку как стрелку, а магнитную систему вместо квадрантов.

*) e) Измерение малых напряжений капилярным электрометром.

Для измерения очень малых напряжений применяют предложенный Липманном капиллярный электрометр. Действие этого прибора основано на том, что поверхностное натяжение ртути, находящейся в соприкосновении с электролитом, уменьшается с увеличением разности потенциалов между ртутью и электролитом. Этот электрометр пригоден для измерения только очень малых напряжений, т. к. поверхностное натяжение ртути достигает минимума при разности

потенциалов около 1-го вольта; этот прибор также часто применяют для нулевых методов. Липманн придал капиллярному электрометру конструкцию, показанную на фиг. 85. Здесь K-стеклянная трубка, отчасти наполненная ртутью и вытянутая на конце в очень тонкий капилляр, поперечное сечение которого постепенно уменьшается к концу, опущенному в стаканчик G. На дно этого стаканчика налита ртуть A, сверх нее слабый раствор серной кислоты. Ртуть в капилляре соединена проволочкой с зажимом K_1, ртуть в стаканчике с K_2. Трубка K соединена с резиновым баллоном B, этот последний снабжен зажимным винтом C; манометр D показывает давление в трубке. Положение конца столбика ртути в капилляре наблюдают через микроскоп M с крестом из паутинок в окуляре. Перед началом измерения, чтобы удалить воздух из капилляра сдавливают B с помощью винта C и тем увеличивают давление в трубке K, до тех пор пока из капилляра не вытечет капля ртути. Затем отпускают C, тогда ртуть в конце капилляра поднимается, за ней поднимется и раствор серной кислоты. Полученное положение ртути и будет нулевым положением. Затем приключают к K_1 и K_2 исследуемое напряжение, отчего поверхностное натяжение ртути в капилляре уменьшится, нижний кончик столбика поднимется; зажимая C и тем увеличивая давление в трубке, можем вернуть этот кончик столбика ртути в первоначальное положение, при чем о повышении давления в K можем судить по манометру D. Капиллярный электрометр градуируют с помощью известного напряжения.



Фиг. 85

---

1) ZfJ. 65 (1907). 2) ZfJ. 123 (1906). 3) Wied. Ann. 1 (1886).
4) ZfJ. 97 (1903). 5) ZfJ. 147 (1906); 72 (1907); 144 (1908) (PTR).
6) Lum. el. 148 (1886) 7) Ann. d. Ph. (26) 312—328 (1908).
8) Phys. Z. 480 (1912); ETZ. 16 (1913).
9) Phys. Z. 237 (1913); ETZ. 750 (1913).
10) ZfJ. 33 (1909); ETZ. 435 (1909).
11) AfE. 1,88 (1912); ETZ. 246 (1913). 12) Phys. Z. 744 (1912).
13) ZfJ 110 (1903); 14) ETZ. 436 (1909).
15) ETZ. 447 (1891); 774 (1902); 502 (1907) (также PTR).
16) Dinglers Polyt. Journ. (7) (1906).
17) El. 1000 (1908); ZfJ. 87 (1909) (рефер.).
18) ZfJ. 241 (1909); ETZ. 420 (1911) (рефер.).
19) Joyrn. Inst. El. Eng. 455 (1909); ZfI. 238 (1909) (рефер.).
20) ZfJ. 149 (1909); 21) Joyrn. Inst. El. Eng. 3 (1912); ETZ. 1350 (1913).
22) ETZ. 466 (1909; ZfJ. 241 (1909). 23) ZfJ. 112 (1903).
24) ETZ. 362 (1911).
26) Pogg. Ann. (149) 546 1873; см. также Laar, Ztschr. f. Phys. Chemie (41) 385 (1902).

28. Измерение тока вольтаметром.

Вольтаметрами называются аппараты, которые позволяют по электролитическому действию тока определить протекшее количесто электричества и соответственно силу тока. Если через жидкость, в течение t секунд, протекает ток постоянной силы в J амп., что соответствует количеству электричества $Q = J.\ t$ кулонов, то по закону Фарадэя этот ток отложит:

$$G = \epsilon \cdot J \cdot t \text{ mg.}$$

вещества. Здесь

$$\epsilon = \frac{G}{J \cdot t} = \frac{G}{Q}$$

обозначает количество вещества в mg., отлагаемое единицей количества электричества (1 кулон) и называется электрохимическим эквивалентом.

Так как $F = 96494$ кулона отлагает один химический грамм эквивалент $\frac{a}{w}$, где a обозначает химический эквивалентный вес данного вещества в граммах, w валентность, то $\epsilon = \frac{a \,.\, 1000}{w \,.\, F.}$

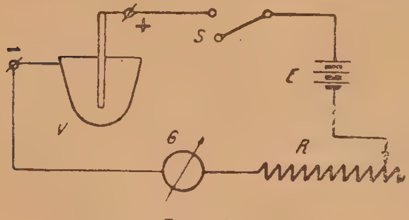
Для серебра

$$\epsilon = \frac{107{,}88 \cdot 1000}{1 \cdot 96494} = 1{,}1180 \; mg/\text{кулон};$$

для меди из $CuSO_4$:

$$\epsilon = \frac{63{,}57 \,.\, 1.000}{2 \,.\, 96494} = 0{,}3294$$

При точных измерениях для контроля амперметров служит серебряный вольтаметр[1]). Он состоит из платинового тигля в качестве катода (отрицательного полюса) на котором отлагается серебро и стержня из чистого серебра в качестве анода (положительного полюса). Во время работы маленькие частицы серебра могут отвалиться от анода, и тем внести ошибку в измерение; чтобы избежать этого стержень завертывают в тонкий (вымытый) шелк или ставят на дно тигля маленький стеклянный стаканчик. В качестве нормального раствора в тигель наливают, по правилам *PTR*, раствор 30 *gr.* азотнокислого серебра ($AgNO_3$) в 100 *gr.* дистиллированной, свободной от хлора, воды[2]). Плотность тока на катоде должна быть около двух ампер на кв. дециметр. Для измерения пользуются схемой изображенной на фиг. 86.



Фиг. 86

Здесь E — аккумулятор с напряжением 4 ÷ 6 вольт; R регулируемое сопротивление; G — гальваноскоп или амперметр, включенный для контроля постоянства силы тока или для проверки шкалы; V — вольтаметр, S — выключатель.

Предварительным опытом устанавливают истинную плотность тока, затем размыкают S и вынимают платиновый тигель. Его чистят азотной кислотой, промывают сначала дистиллированной водой, затем спиртом и слегка прокаливают. После того, как тигель остынет, определяют его вес G_1 в *mg.*, наполняют, ставят на место и замыкают S. Через t секунд размыкают цепь, выливают раствор из тигля и промы-

вают тигель дистиллированной водой до тех пор, пока в воде не останется никакой мути от соляной кислоты. После того, как тигель высохнет определяют его вес G_2. Вес осадка в тигле тогда будет $G = G_2 - G_1$. Если сила тока J была постоянной, то она определится по формуле:

$$J = \frac{G_2 - G_1}{1{,}1180 \cdot t} \text{ амп.}$$

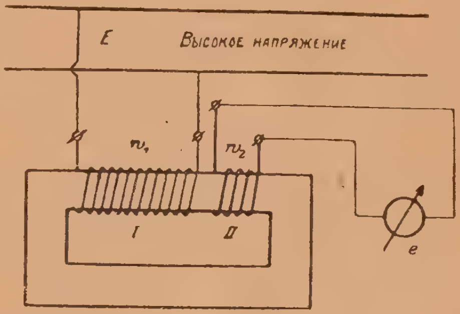
При колебаниях силы тока, формула даст среднее значение.

[1]) ETZ, 232, 1168 (1913), 789, 819, (1914).
[2]) ETZ, 435, (1901).

29. Измерение напряжения и силы тока при высоком напряжении переменного тока.

Проще всего для подобного измерения было бы взять приборы для низкого напряжения с соответственно большими добавочными сопротивлениями, с тем, чтобы в последних поглощалась часть напряжения. Не говоря уж о дороговизне и громоздкости таких сопротивлений, подобный род установки недопустим на распределительных щитах, на которых все части, легко доступные обслуживающему персоналу, не должны обладать, по отношению к земле, потенциалом, опасным для жизни.

Удобен для применения делитель напряжения (срав. § 27), состоящий из конденсатора и, включенного последовательно с ним, безиндукционного сопротивления, — частичное напряжение на котором определяется статическим вольтметром. Такая установка предложена фирмой Siemens-Schuckert-Werke (DRP 256041).



Фиг. 87

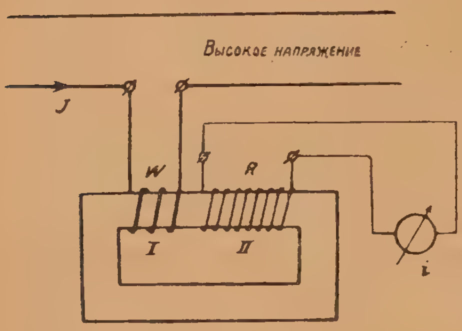
В большинстве же случаев удобнее всего включать высокое напряжение к первичной обмотке вспомогательного или измерительного трансформатора, вторичная обмотка которого и действует на прибор низкого напряжения. Шкала этого прибора, конечно, градуирована в единицах высокого напряжения, чтобы определять последнее без пересчетов. Точность этих измерений, в зависимости от величины напряжения и коэффициента трансформации, около $2 \div 10\permil$. Затруднения создаются благодаря присутствию железа (рассеяние, изменение магнитной проницаемости) и действиям электрического и магнитного полей (сдвиг фаз между первичной и вторичной цепью).

Конструкция измерительных трансформаторов напряжения и тока различна. Измерительный трансформатор для преобразования напряжения (фиг. 87) состоит из первичной обмотки I с большим числом витков тонкой проволоки и вторичной II с малым числом витков, помещенных на железной раме. Первичная обмотка включается между двумя проводами, напряжение между которыми нужно измерить, вторичная же—к вольтметру. Если w_1 и w_2 числа витков обмоток, то коэффициент трансформации будет

$$u = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E}{e} \quad \text{или} \quad e = \frac{w_2}{w_1} \cdot E\,.$$

Напряжение e, для вольтметра на распределительном щите, выбирается в зависимости от условий установки.

При измерении **токов** первичную обмотку (I) (фиг. 88) делают из немногих витков w_1 толстой проволоки, а вторичную (II) из большого числа витков w_2 тонкой проволоки. Ток i определяется по уравнению $i = J \cdot \frac{w_1}{w_2}$. Чтобы сопротивление первичной обмотки W лишь незначительно изменяло сопротивление провода, эту обмотку часто делают только из одного витка. Хороший обзор систем измерительных трансформаторов дал Гевеке (Gewecke)[1], а их теорию и расчет—Вирц (Wirz)[2].

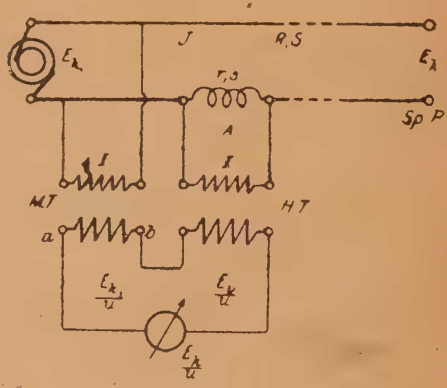


Фиг. 88

Особенно интересна конструкция измерительного трансформатора[3]) на 60.000 вольт фирмы **Siemens & Halske.**

Устройство специальных измерительных проводов для измерения напряжения в удаленных питательных пунктах стоит очень дорого. Чтобы избежать этого, можно воспользоваться схемой, показанной на фиг. 89.

Если питательный провод (фидер) имеет уаттное сопротивление R и индуктивное сопротивление S, то в один провод включают катушку A из немногих витков с уаттным сопротивлением r и индуктивным сопротивлением s. Провода ведут от клемм генератора к первичной обмотке (I) измерительного трансформатора MT с коэффициентом трансформации u. Если генератор не нагружен, то напряжение генератора E_{k1} равно напряжению в питательном пункте E_k, и напряжение на клеммах $a \div b$ измерительного трансформатора будет $\frac{E_k}{u}$.



Фиг. 89

Если же к питательному пункту идет ток J, то он вызывает падение напряжения $E_v = J . \sqrt{R^2 + S^2}$, где r и s содержатся, как часть, в R и S. Тогда, при условии постоянства напряжения E_k, генератор должен давать напряжение $E_{k1} = \Sigma\,(E_k, E_v)$, где знак $\Sigma\,(\ldots)$ обозначает, что величины в скобках складываются геометрически. Чтобы определить E_k, мы должны из вторичного напряжения измерительного трансформатора $\frac{E_{k1}}{u} = \Sigma\left(\frac{E_k}{u}, \frac{E_v}{u}\right)$ вычесть геометрически величину $\frac{E_v}{u}$. Для этой цели к катушке A приключим первичную обмотку вспомогательного трансформатора HT, а его вторичную обмотку соединим со вторичной обмоткой измерительного трансформатора

MT так, чтобы на вольтметр действовала геометрическая разность обоих напряжений. Если коэффициент трансформации вспомогательного трансформатора $u_k = 1$, то напряжение на его первичных клеммах должно быть

$$\frac{E_v}{u} = \frac{J}{u} \cdot \sqrt{R^2 + S^2}$$

Чтобы получить это напряжение на концах катушки A нужно, чтобы

$$\frac{J}{u} \cdot \sqrt{R^2 + S^2} = J \cdot \sqrt{r^2 + s^2} .$$

или

$$\frac{R^2}{u^2} + \frac{S^2}{u^2} = r^2 + s^2$$

Из условия, что фазы $\frac{E_v}{u}$ и E_v совпадают, далее следует

$$r^2 = \frac{R^2}{u^2} \quad \text{или} \quad r = \frac{R}{u}$$

и

$$s^2 = \frac{S^2}{u^2} \quad \text{или} \quad s = \frac{S}{u}$$

В общем случае, если коэффициент трансформации вспомогательного трансформатора u_h, то его первичное напряжение должно быть $\frac{E_v}{u} \cdot u_h$, для чего нужно, чтобы

$$\frac{J}{u} \cdot u_h \cdot \sqrt{R^2 + S^2} = J \cdot \sqrt{r^2 + s^2} .$$

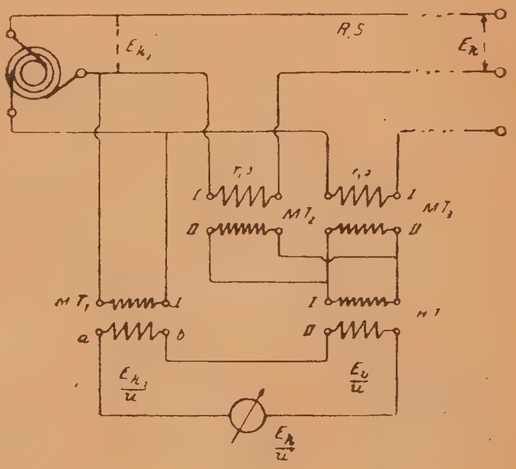
Решив это уравнение, получим

$$r = \frac{u_h}{u} \cdot R \quad \text{и} \quad s = \frac{u_h}{u} \cdot S .$$

Напр., пусть $u = 20$ и $u_h = \frac{1}{5}$,

тогда $r = \frac{R}{100}$ и $s = \frac{S}{100}$.

Точная установка на вольтметре $\frac{E_k}{u}$ достигается лучше всего включением шунта к катушке A.



Фиг. 90

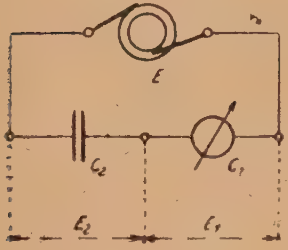
Для **трехфазного тока** пользуются включением по схеме фиг. 90. В две фазы включают трансформаторы тока MT_2 и MT_3 с уаттным сопротивлением r и индуктивным сопротивлением s, вторичные обмотки этих трансформаторов соединяют параллельно и включают к первичной катушке вспомогательного трансформатора HT. В остальном способ обращения тот же, что и описанный выше.

Раш (Rasch) [21]) предложил метод для измерения напряжения постоянного тока в удаленных питательных пунктах без специальных измерительных проводов.

Для измерения низких напряжений пользуются электростатическими приборами, построенными по принципу электрометра, этот же принцип применен] в электростатических (сокращенно — статических)

вольтметрах для измерения высоких напряжений. Конечно, и в этом направлении есть граница, которая лежит между 7000 и 10000V. За ней для расширения пределов измерения нужно применять вспомогательные приспособления, как это и предложили Франке [5]) и Пейкерт [6]). Оба эти предложения основаны на принципе применения конденсаторов в последовательном или параллельном соединении для расширения пределов измерения.

Если статический вольтметр (фиг. 91) обладает емкостью C_1, и последовательно с ним включен конденсатор емкостью C_2, то при напряжениях E_1 и E_2 заряды обоих приборов будут



Фиг. 91.

$$Q_1 = C_1 \cdot E_1 \text{ и } Q_2 = C_2 \cdot E_2.$$

А так как $Q_1 = Q_2$, то следовательно $C_1 \cdot E_1 = C_2 . E_2$ или

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{C_1}{C_2} \text{ и далее } \frac{E_1 + E_2}{E_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_2}.$$

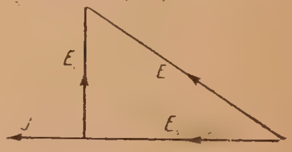
При этом, однако, $E_1 + E_2 = E$, почему

$$\frac{E}{E_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_2} \text{ или } E = \frac{C_1 + C_2}{C_2} \cdot E_1.$$

Если взять $C_2 = C_1$, то предел измерений будет удвоен, так как тогда $E = 2E_1$. Для $C_2 = \frac{1}{9} C_1$ будем иметь $E = 10 E_1$, т.-е. в этом случае шкала будет расширена в 10 раз. Чтобы получать, нужные при этом, очень малые емкости, можно применять в качестве диэлектрика воздух или включать последовательно большое количество конденсаторов.

Однако, описанные устройства можно применять лишь в том случае, когда емкость C_1 измерительного прибора остается постоянной при любом отклонении. В большинстве же случаев это не так, почему приходится либо сравнивать показания прибора с эталоном, либо определять зависимость емкости от напряжения. Лучше всего эту зависимость изобразить графически в виде кривой, которой можно пользоваться для поправок при измерении.

Однако, эта емкость очень мала, почему точно измерить ее довольно трудно. Проще всего, в этом случае, включить электрометр, последовательно с очень большим (много мегом) известным безиндукционным (графитовым) сопротивлением R, под известное же напряжение переменного тока E. Тогда прибор покажет на своих клеммах напряжение E_1, сдвинутое по фазе на 90°, относительно напряжения на добавочном сопротивлении (фиг. 92);



Фиг. 92.

почему $E_2 = \sqrt{E^2 - E_1^2}$, откуда зарядный ток конденсатора будет

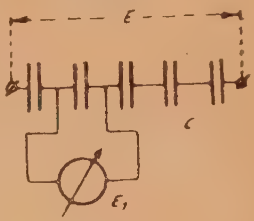
$$J = \frac{E_2}{R}.$$

А так как число периодов ν известно, то находим

$$C_1 = \frac{J}{E_1 \cdot \omega}, \text{ где } \omega = 2\pi . \nu.$$

Изменяя R можно получить различные напряжения E_1 и вычислить соответствующие им емкости прибора.

Вместо того, чтобы включать конденсаторы последовательно с электрометром, можно, как это предложил Пейкерт, включить последовательно большое число конденсаторов одинаковой емкости и от обкладок одного из них отвести провода к электрометру. Если всего взято n одинаковых конденсаторов, то всё напряжение будет $E = n . E_1$. Однако, этот способ пригоден только в том случае, если емкость конденсаторов совершенно не изменяется, что бывает очень редко, а также если емкость прибора незначительна по сравнению с емкостью одного конденсатора. Поэтому эта комбинация применяется гораздо реже, чем последовательное включение конденсаторов и электрометра.



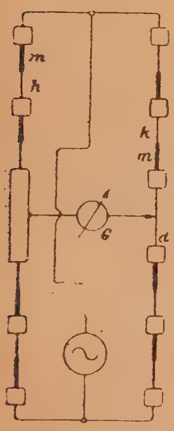
Фиг. 93

Для абсолютных измерений напряжений до 180.000 вольт Чернышев построил специальный прибор [7]), который состоит из электрометра с защитным кольцом по Томсону и заключен в сосуде с воздухом сжатым до 10 $kg./cm^2$. Удвоение этого прибора дает электростатический уаттметр.

1) El. Kr. u. Bahnen (8) (1914). 2) Bull. SEV. (44) 365.
3) ETZ. 1039 (1911). 4) ETZ. 805 (1906).
5) Wied. Ann. (50) (1893). 6) ETZ. 657 (1898); 231 (1904).
7) Электричество 223 (1911); ETZ. 656 (1914).

30. Измерение переменных токов малой силы с высоким числом периодов.

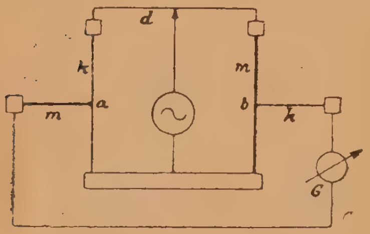
Для измерения слабых переменных токов можно пользоваться термоэлементами, включенными по Саломонсону (Salomonson) [1]) (фиг. 94). Измеряемый переменный ток протекает через две параллельные ветви из одинакового числа термоэлементов из манганина (m) и константана (k). Эти термоэлементы включены так, что появляющиеся в них, вследствие нагревания переменным током, эл.-движ. силы взаимно компенсируются по отношению к цепи переменного тока,— наоборот, по отношению к ветви гальванометра эти эл.-дв. силы включены последовательно. Проволока d с ползушкой служит для установки на нулевое положение. Проволочки термоэлементов употребляют толщиной около 0,025 *mm.* и длиной 6 *mm.* Для охлаждения концов они снабжены латунными прокладками. Нагрузка в вакууме может доходить до 10 миллиампер.— Если проволоки не вполне свободны от накипи спая, то они показывают небольшую, но постоянную зависимость от направления тока. Достаточно один раз определить эту поправку и проградуировать прибор постоянным током, чтобы потом применять его для измерения переменного тока. Проволоки диаметром 0,3 mm можно спаивать вполне точно.



Фиг. 94

Если желают измерить малые напряжения, потребляя при этом возможно меньше энергии, то пользуются, по указаниям PTR[2]), комбинацией из манганиновых и константановых проволочек толщиной

в 20 μ (фиг. 95). При этом устраняется эффект Пельтье, почему не бывает расхождения между постоянным и переменным токами. Эл.-движ. силы, появляющиеся в местах спая *a* и *b* складываются по отношению к ветви гальванометра. Измерительная проволока *d* с ползушкой служит для того, чтобы разделить переменный ток на две параллельные ветви так, чтобы точки *a* и *b* имели одинаковый потенциал. При пользовании таким прибором, с сопротивлением 5,1 Ω токи в 50 миллиампер дают отклонение до 150 делений шкалы гальванометра. Тиме (Thieme) предложил конструкцию, в которой тепловая нить действует на вакуумтермоэлемент; напряжение последнего измеряется с помощью компенсации.

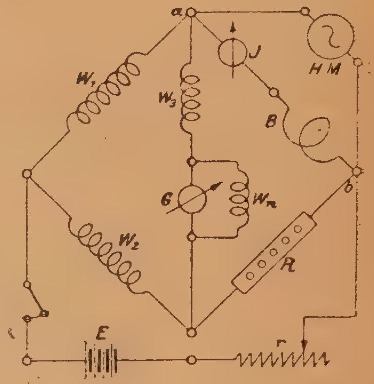


Фиг. 95.

Для измерения переменных токов высокой частоты пользуются методом Кэннели (Kennelly)[4], — сила тока определяется по уменьшению сопротивления проволоки малой массы. Бэла Гати[5]) употребляет для такого измерения болометр Фессендена[6]), с проволокой 0,5 μ при 20 Ω сопротивления включенной в мостик Уитстона (фиг. 96).

Сопротивления W_1 W_2 W_3 W_n и гальванометр *G* обладают большой самоиндукцией, благодаря чему почти весь ток генератора высокой частоты *HM* проходит через болометр *B*. W_1 и W_2 обладают уаттным сопротивлением около 1000 Ω.

Для градуирования установки, на место *H*, к точкам *a b* включают источник постоянного тока и регулируют, при различных силах постоянного тока J_g, сопротивление *R* так, чтобы гальванометр *G* не давал отклонения. По снятой таким образом градуировочной кривой $f(R, J_g)$, можем затем, на основании величины *R*, определять силу переменного тока. Сопротивление *r* подбирается так, чтобы через ветвь болометра протекал ток *J*, силой около 2 миллиампер.



Фиг. 96.

По способу трех амперметров (§ 31) можно этим же путем определить и мощность переменного тока. Для измерения переменных токов небольшой силы и высокой частоты фирма F. Ducretet & E. Roger, Paris, изготовляет измерительный прибор системы Р. Арно (R. Arno)[7]), основанный на принципе вращающегося поля. Ларсен[8]) применяет для этого „комплексный“ компенсатор.

---

1) Phys. Z. 463 (1906). Zfl. 149 (1907) (PTR).
2) Zfl. 147 (1909) сравн. ETZ. 467, 1103 (1906): Zfl. 143 (1908); El. Anz. 588 (1910); ETZ 95 (1912).
3) AfE. 309 (1912); ETZ. 722 (1912).
4) ZfE. (41) (1904).
5) El. World, 30 Juni (1906); El. и M. Wien. 462 (1906) (рефер.).
6) ZfE. 39 (1902).
7) Der Mechaniker 219 (1909).
8) ETZ. 1039 (1910).

31. Измерение электрической мощности.

а) Измерение уаттметром.

I. Однофазные токи.

В большинстве случаев, для этого измерения употребляют приборы, построенные по электродинамическому (иначе динамометрическому) принципу с неподвижной катушкой тока H и подвижной катушкой напряжения S, кроме того уаттметры, по Феррарису, с вращающимся полем, и электрометры.

Если через катушку тока H протекает ток J_t, любой формы кривой, и катушка напряжения S включена под напряжение переменного тока E_t, так что при собственном омическом сопротивлении ρ этой катушки, она потребляет ток $i_t = \frac{E_t}{\rho}$, то средняя сила, действующая на подвижную систему, будет

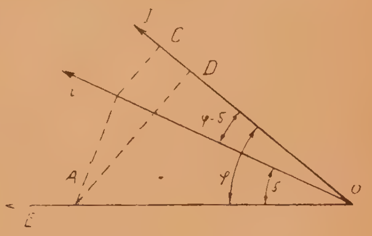
$$M = c_1 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T M_t \cdot dt = c_1 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T J_t \cdot i_t \cdot dt,$$

равна крутящей силе пружины $c_2 \cdot \alpha$, или

$$\frac{c_2}{c_1} \cdot \alpha = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_t \cdot i_t \cdot dt \cdot$$

Если мы подставим $i_t = \frac{E_t}{\rho}$, то получим

$$c \cdot \alpha \cdot \rho = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E_t \cdot J_t \cdot dt = P$$



Фиг. 97.

Эту же мощность покажет прибор и при постоянном токе, если напряжение и сила тока имеют то же значение, что и величины переменного тока.

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_t^2 \cdot dt} \quad \text{и} \quad E = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T E_t^2 \cdot dt}$$

Поэтому прибор можно проградуировать с помощью постоянного тока.

До сих пор в наших рассуждениях мы принимали, что напряжение и ток в катушке S совпадают по фазе. Откажемся теперь от этого предположения и примем во внимание сдвиг фаз δ, вызываемый самоиндукцией катушки напряжения. Диаграмма токов тогда будет иметь вид, данный на фиг. 97. Мощность, которую должен показать прибор: $P = E \cdot J \cdot \cos \varphi$. Вместо этого он покажет:

$$J \cdot i \cdot \cos(\varphi - \delta) = c. \alpha.$$

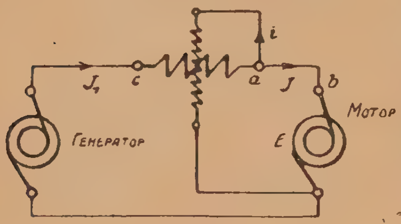
Мы можем сюда подставить $i = \frac{E \cdot \cos \delta}{\rho}$, что даст

$$c \cdot \alpha \cdot \rho = J \cdot E \cdot \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \delta) .$$

Если мы возьмем отношение

$$\frac{P}{P'} = F = \frac{\cos\varphi}{\cos\delta \cdot \cos(\varphi - \delta)} = \frac{1 + tg^2\delta}{1 + tg\,\varphi \cdot tg\,\delta},$$

то F и будет поправочным коэффициентом, на который нужно умножать отсчитанное значение $P' = c \cdot \alpha \cdot \rho$, чтобы получить истинную мощность P. (Поправочный коэффициент Стефанса). В некоторых случаях, когда измеряемая мощность очень невелика, мы должны вводить поправку на мощность, потребляемую самим прибором. Для этого рассмотрим включение по схеме фиг. 98, с помощью которого нужно измерить мощность, потребляемую мотором $P = E \cdot J \cdot \cos\varphi$. Показание прибора, если пренебречь влиянием сдвига фаз в катушке напряжения, будет:



Фиг. 98.

$$c \cdot \alpha = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_{1t} \cdot i_t \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (J_t + i_t) \cdot i_t \cdot dt =$$

$$= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_t \cdot i_t \cdot dt + \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2_t \cdot dt.$$

Подставив сюда $i_t = \frac{E_t}{\rho}$, получим

$$c \cdot \alpha \cdot \rho = P_1 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_t \cdot E_t \cdot dt + \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_t \cdot E_t \cdot dt = P + P_s,$$

где P_s обозначает мощность, потребляемую в катушке напряжения. Если мы раз'единим провод $a \div b$ к мотору, то прибор всё же покажет некоторое отклонение, так как катушки тока и напряжения, включенные последовательно, замыкают цепь тока. Так как в данном случае ток i, протекающий через катушки тока и напряжения, остался приблизительно тем же, что и во время измерения, то при отклонении стрелки прибора α_s отсчитаем мощность на шкале:

$$c \cdot \alpha_s \cdot \rho = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_t \cdot E_t \cdot dt.$$

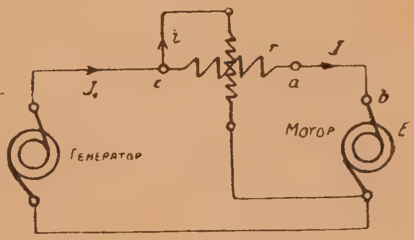
Но это и есть величина P_s, т.-е. мощность, потребляемая в самом приборе. Однако, так как отклонение α_s относительно мало, то P_s будет измерено неточно. Поэтому целесообразнее определять потребление мощности в приборе путем подсчета по уравнению $P_s = \frac{E^2}{\rho}$.

Если мы приключим один конец катушки напряжения вместо a, к c (фиг. 99) (при высоких напряжениях и слабых токах), то через катушку тока будет протекать только ток мотора, зато катушка напряжения будет находиться под напряжением, увеличенным на величину потери напряжения в катушке тока.

Отклонение стрелки вызывается токами J и i, так что в этом будем случае иметь соотношение:

$$c \cdot \alpha = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J \cdot i \cdot dt,$$

где, однако, $i_t = \dfrac{E_t + J \cdot r}{\rho}$,



Фиг. 99

таким образом $c \cdot \alpha \cdot \rho = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_t \cdot (E_t + J_t \cdot r) \cdot dt =$

$$= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_t \cdot E_t \cdot dt + \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J^2_t \cdot r \cdot dt = P + P',$$

где

$$P' = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J^2_t \cdot r \cdot dt = J^2 \cdot r$$

обозначает мощность, потребляемую в катушке тока. Таким образом прибор показывает мощность больше потребляемой мотором на величину потери мощности в катушке тока.

Вследствие самоиндукции катушки напряжения, эти данные должны быть еще раз исправлены. Лучше, однако, сделать ошибку, по возможности, незначительной. Для этой цели мы должны только в уравнении $tg\,\delta = \frac{L \cdot \omega}{\rho}$, где L обозначает коэффициент самоиндукции катушки, сделать возможно большим знаменатель ρ, для чего в приборах для низкого напряжения (от 5 до 20 V), сопротивление бывает относительно велико (150 до 1000 Ω), а сила тока i мала.

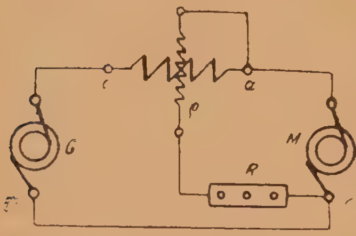
Орлих [1]) дал подробные указания по поводу работ с электродинамическим уаттметром и расчета поправок к его показаниям.

Для более высоких напряжений включается добавочное безиндукционное сопротивление R, благодаря чему $tg\,\delta = \frac{L \cdot w}{\rho + R}$ становится исчезающе малым. Поэтому, при более высоких напряжениях поправка на самоиндукцию катушки напряжения не нужна, но ее необходимо вводить при низких напряжениях и сильных токах. Добавочное сопротивление должно быть включено так, чтобы (особенно при высоких напряжениях) не получалось высокой разности потенциалов между

катушками. Правильное включение показано на фиг. 100. Как простейшее правило можно принять следующее: от одной из клемм a катушки тока нужно итти прямо в катушку напряжения, а не в добавочное сопротивление.

При сильных токах, когда пользуются измерительным трансформатором тока, нужно еще вводить поправки на изменение с нагрузкой коэффициента трансформации и на сдвиг по фазе вторичного тока [2]).

Недостатки уаттметров электро-динамической системы почти такие же, как электродинамических амперметров и вольтметров. Особенно неудобна в практике присущая им магнитобоязнь, однако, для всех точных измерений пользуются почти исключительно приборами этой системы.



Фиг. 100.

Ферродинамические уаттметры мало распространены, т. к. присутствие железа вносит трудно устранимые ошибки, вследствие чего точность приборов этой системы едва достигает 1%. В заводских установках широко распространены индукционные уаттметры чаще „по Феррарису“, реже „с экранами“.

Вращающий момент прибора „по Феррарису“ (см. § 1)

$$M = \frac{2\pi \cdot \nu \cdot \sin\varphi}{r} \cdot \Phi_x \cdot \Phi_y ,$$

если взять $\Phi_x = c_1 \cdot J_m$ и $\Phi_y = c_2 \cdot E_m$, где J_m и E_m — амплитуды рабочего тока и напряжения, при условии, что Φ_x в фазе с J_m и Φ_y в фазе с P_m получим:

$$M = \frac{c_1 \cdot c_2}{r} \cdot 2\pi \cdot \nu \cdot J_m \cdot E_m \cdot \sin\varphi ,$$

где φ — угол сдвига фаз между J_m и E_m, r — сопротивление алюминиевого барабана; с другой стороны мощность, потребляемая в цепи

$$P = J \cdot E \cdot \cos\varphi = \frac{J_m \cdot E_m}{2} \cdot \cos\varphi ,$$

следовательно, для того чтобы можно было воспользоваться прибором как уаттметром нужно превратить функцию синуса в функцию косинуса. Этого можно достичь сдвинув искусственно ток в катушках напряжения по фазе на 90°, по отношению к напряжению сети. Тогда вращающий момент будет

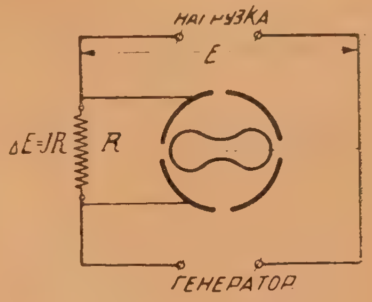
$$M = \frac{c_1 \cdot c_2}{r} 2\pi \cdot \nu \cdot J_m \cdot E_m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \frac{c}{r} \cdot \nu \cdot J \cdot E \cdot \cos\varphi ;$$

как видно из формулы, показания прибора зависят от температуры (благодаря большому температурному коэффициенту алюминия) и от частоты переменного тока. Собственно, уаттметры этой системы вполне точны только при одном определенном напряжении (вследствие влияния насыщения железа) и частоте; зато они просты, способны выдерживать большие перегрузки и нечувствительны к внешним магнитным полям.

Тепловые уаттметры в практике распространения не получили, благодаря грубости показаний, непрочности в электрическом отношении и конструктивному несовершенству. В основу их устройства положена формула

$$(i+i')^2-(i-i')^2=4i\cdot i'=c\cdot P,$$

где i — пропорционально измеряемой силе тока, i' — напряжению. Если сконструировать тепловой прибор так, чтобы через одну его нить протекал ток $i+i'$, через другую $i-i'$, а отклонение стрелки зависело от разности в нагревании обоих нитей, то прибор покажет мощность, потребляемую в цепи.



Фиг. 101.

Электростатические уаттметры применяются, главным образом, в лабораторных условиях. Выше был описан метод измерения мощности квадрантным электрометром, эта же схема положена в основу устройства электростатического уаттметра (фиг 101). R — есть вспомогательное сопротивление, падение напряжения ΔE в котором пропорционально силе тока в цепи. ΔE относительно невелико, почему потеря энергии в R незначительна. Преимущества этой системы уаттметров таковы:

1) возможность точно измерить мощность при малых величинах $\cos\varphi$.

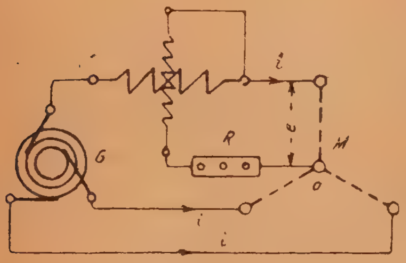
2) пригодность для высоких напряжений;

3) способность выдерживать большие перегрузки;

Однако, для промышленной практики эти приборы слишком хрупки, сложны и дороги.

2. Многофазные токи.

Мощность многофазной системы равна сумме мощностей отдельных фаз, так что, в общем виде, можно написать: $P=P_1+P_2+...P_n$, а для чаще всего употребляемой в практике трехфазной системы: $P=P_1+P_2+P_3$. Поэтому мы можем измерить общую мощность несвязанной системы с помощью трех приборов.

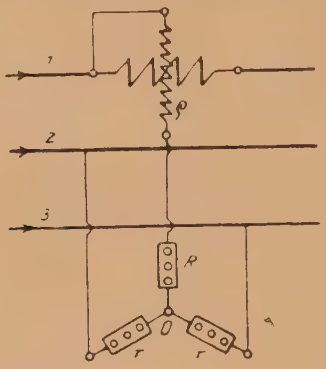


Фиг. 102.

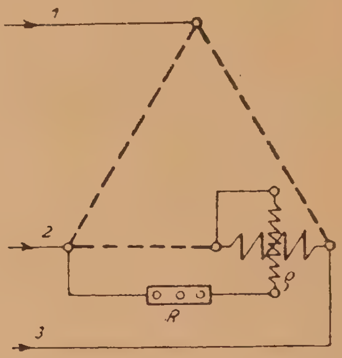
Если же отдельные фазы связаны между собой, то можно применять включение звездой и треугольником. Рассмотрим сначала равномерную нагрузку и одинаковый сдвиг фаз во всех трех фазах; в этом случае: $P=3\cdot e\cdot i\cdot\cos\varphi$, где e и i обозначают напряжение и силу тока в одной фазе. На основании этого уравнения, при равномерной нагрузке, нужно только определить мощность в одной фазе $e.\ i.\ \cos\varphi$; для этого пользуются включением по схеме фиг. 102, однако оно возможно только тогда, когда доступна нулевая точка O звезды.

В случае же, если эта точка недоступна, то ее можно образовать искусственно, для чего, по Бэн-Эшенбургу (Behn—Eschenburg), берут

два одинаковые сопротивления r (фиг 103), включают их в виде звезды к линейным проводам и с точкой O соединяют катушку напряжения. Однако, при измерениях холостого хода асинхронных моторов и трансформаторов это включение не применимо из за неравенства токов и напряжений. Какую ошибку дадут измерения по этому способу при различных нагрузках фаз подробно указал Шмидель (Schmiedel).



Фиг. 103.



Фиг. 104.

При включении треугольником (фиг 104) для измерения нужно было бы раз'единить соединение двух фаз, чтобы включить катушку тока в одну из них, чем однако было бы изменено сопротивление данной фазы по отношению к другим.

Введем в уравнение мощности трехфазной цепи линейные напряжения и токи (большие буквы), для включения звездой: $E = e \cdot \sqrt{3}$, $J = i$ и для включения треугольником: $E = e$, $J = i \cdot \sqrt{3}$, на основании чего получим:

$$P_{\curlywedge} = \frac{3 \cdot E}{\sqrt{3}} \cdot J \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot E \cdot J \cdot \cos \varphi,$$

$$P_{\Delta} = \frac{3 \cdot E \cdot J}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot E . J \cdot \cos \varphi,$$

где φ угол сдвига фаз между e и i.

Теперь возьмем общий случай, когда по трем проводам электрическая энергия передается к нагрузке, включенной звездой, как показано на фиг. 105; нулевая точка при этом недоступна. Общую мощность мы можем при любой нагрузке для любого момента выразить как сумму трех мгновенных мощностей отдельных фаз:

$P_t = P_{1t} + P_{2t} + P_{3t}$ или, так как $P_{1t} = e_{1t} . i_{1t}$ и т. д., то, подстановкой получим:

$$P_t = e_{1t} . i_{1t} + e_{2t} . i_{2t} + e_{3t} . i_{3t}.$$

Но мы можем измерить только линейные напряжения и токи, поэтому должны соответственно преобразовать уравнение, что легко сделать с помощью уравнений:

$$i_{1t} + i_{2t} + i_{3t} = O \text{ и } i_{1t} = J_{1t},\ i_{2t} = J_{2t},\ i_{3t} = J_{3t}.$$

Подставив $i_{3t} = -(i_{1t} + i_{2t})$ в уравнение мощности, мы получим:

$$P_t = e_{1t} \cdot i_{1t} + e_{2t} \cdot i_{2t} - e_{3t} \cdot (i_{1t} + i_{2t}) =$$
$$= i_{1t} \cdot (e_{1t} - e_{3t}) + i_{2t} \cdot (e_{2t} - e_{3t})$$

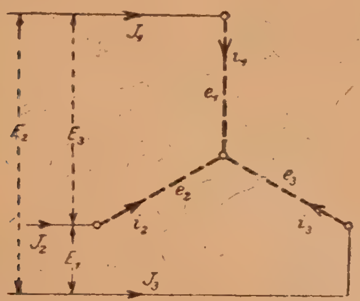
или, так как $e_{1t} - e_{3t} = -E_{2t}$ и $e_{2t} - e_{3t} = E_{1t}$, то

$$P_t = -i_{1t} \cdot E_{2t} + i_{2t} \cdot E_{1t} = -J_{1t} \cdot E_{2t} + J_{2t} \cdot E_{1t}.$$

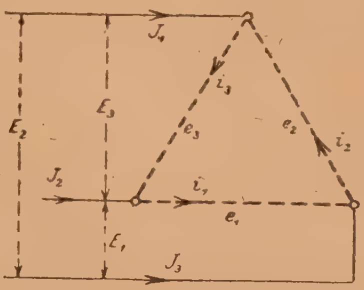
Общая мощность за время одного периода равна средней сумме мгновенных мощностей:

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T P_t \cdot dt = P = -\frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_{1t} \cdot E_{2t} \cdot dt + \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_{2t} \cdot E_{1t} \cdot dt = -P_1 + P_2.$$

Если мы заставим действовать соответствующие напряжения и токи по методу Арона (Aron) [4], на катушки двух уаттметров, то



Фиг. 105.



Фиг. 106.

алгебраическая сумма отсчетов $(\alpha_1 + \alpha_2)$ даст нам всю мощность трехфазной системы, так как отрицательная мощность P_1 соответственно определению направления напряжений, будет измерена положительным отклонением α_1 [5]).

Для включения треугольником (фиг. 106) равным образом имеем:

$$P_t = e_{1t} \cdot i_{1t} + e_{2t} \cdot i_{2t} + e_{3t} \cdot i_{3t}.$$

Кроме того $\quad e_{1t} + e_{2t} + e_{3t} = 0$

или $\quad e_{3t} = -(e_{1t} + e_{2t})$

и $\quad i_{1t} - i_{3t} = J_{2t}$

$\quad i_{2t} - i_{3t} = -J_{1t},$

из чего следует:

$$P_t = e_{1t} \cdot i_{1t} + e_{2t} \cdot i_{2t} - i_{3t} \cdot (e_{1t} + e_{2t}) = e_{1t} \cdot (i_{1t} - i_{3t}) +$$
$$+ e_{2t} \cdot (i_{2t} - i_{3t}) = E_{1t} \cdot J_{2t} - E_{2t} \cdot J_{1t}.$$

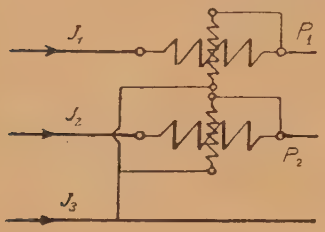
Тогда для одного периода

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E_{1t} \cdot J_{2t} \cdot dt - \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E_{2t} \cdot J_{1t} \cdot dt = P_2 - P_1,$$

причем P_1 опять будет измерено положительным отклонением стрелки прибора, так что P определится как сумма показаний приборов. Итак,

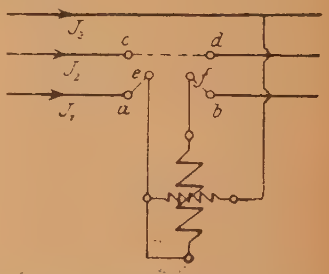
при включении звездой и треугольником мы получили один и тот же результат, как это и можно было предвидеть, так, как при одинаковых напряжениях и токах в фазе, мощность всей системы не зависит от схемы включения. Этот метод применим для любой формы кривой тока и напряжения, как видно из вывода формулы. Схема включения показана на фиг. 107.

При этом измерении можно обойтись и одним прибором, если пользоваться переключателем (Siemens & Halske); с его помощью можно переключать катушку тока из первой фазы во вторую, не разрывая цепи тока, как это показано на фиг. 108. Для этой цели сначала замыкают накоротко *ab*, затем *ea* и *fb* заменяются *cc* и *fd*, и, наконец, размыкается соединение *cd*. Если прибор, при переводе переключателя, показывает отклонения в одном направлении, то эти отсчеты складываются, в противном же случае меньший вычитается из большего.



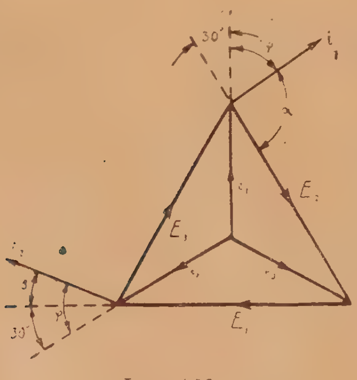
Фиг. 107.

Если же сеть имеет еще четвертый провод между нулевыми точками, то, в общем случае, сумма трех токов в нулевом проводе не равна нулю [6]). В этом случае мощность можно измерить по способам Арона [7]) и Штерна (Stern) [8]). Выведенные при этом формулы Орлих [9]) позднее распространил и на случай, когда сумма трех напряжений в звезде не равна нулю, т.-е. кривые имеют высшие гармонические порядка кратного трем.



Фиг. 108.

Если применять в этом случае метод Фрэлиха [10]), при котором 3 уаттметра включаются в линейные провода, то нужно соединенные в звезду концы катушек напряжения присоединить к нулевому проводу. Это включение необходимо применять при измерении мощности маленьких моторов или нагрузок, потребляющих малую силу тока, так как катушки тока уаттметров дадут большое падение напряжения и при включении по Арону (двух уаттметров) нарушат равномерность напряжений у клемм нагрузки.



Фиг. 109.

При одинаковой нагрузке трех ветвей можно вышеприведенные отношения вывести опять геометрически, исходя из диаграммы [11]) фиг. 109. Если мы включим катушки токов в ветви 1 и 2, а катушки напряжений между 1 и 3 и соответственно между 2 и 3, то первый прибор измерит:

$$P_1 = i_1 . E_2 \cdot \cos \alpha = J_1 \cdot E_2 \cdot \cos [180 - (\varphi + 30°)]$$

и второй

$$P_2 = i_2 \cdot E_1 \cdot \cos \beta = J_2 \cdot E_1 \cdot \cos (\varphi - 30°),$$

или, если мы подставим $J_1 = J_2 = J$ и $E_1 = E_2 = E$, то

$$P_1 = -J \cdot E \cdot \cos (\varphi + 30^0); \; P_2 = J \cdot E \cdot \cos (\varphi - 30^0).$$

Если вычтем первое уравнение из второго, то получим:

$$P_2 - P_1 = J \cdot E \cdot [\cos(\varphi - 30^0) + \cos(\varphi + 30^0)],$$

отсюда, посредством преобразования, находим:

$$P = P_2 - P_1 = J \cdot E \cdot 2 \cos 30^0 \cdot \cos\varphi = J \cdot E \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi.$$

Подставив в это уравнение для включения звездой $J = i$ и $E = e\sqrt{3}$, имеем $P_2 - P_1 = 3 \cdot e \cdot i \cdot \cos\varphi$, а это и есть, как было ранее доказано, общая мощность P трехфазной системы, так что и здесь $P = P_2 - P_1$, где опять $-P_1$ определяется положительным отклонением.

Если, в этой формуле, для P_1 угол $\varphi > 60^0$, то $\cos(\varphi + 30^0)$ будет отрицателен, а потому стрелка прибора отклонится в отрицательном направлении и это показание должно вычитаться из P_2.

На основании обоих отсчетов можно легко определить $\angle\varphi$ сдвига фаз; для этого возьмем отношение

$$\frac{P_2 + P_1}{P_2 - P_1} = \frac{\cos(\varphi - 30^0) - \cos(\varphi + 30^0)}{\cos(\varphi - 30^0) + \cos(\varphi + 30^0)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot tg\,\varphi = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1},$$

при чем $P_2 = c \cdot \alpha_2$ и $-P_1 = c \cdot \alpha_1$.

Отсюда следует:

$$tg\varphi = \sqrt{3} \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1}.$$

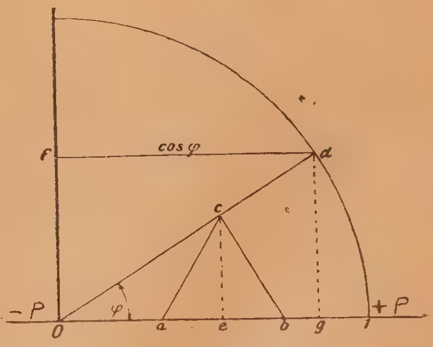
На основании этого уравнения К у д е р н а (Kuderna) [12]) дает аналитико-графический метод для определения коэффициента мощности $\cos\varphi$. Приэтом его метод чрезвычайно прост [13]), так что угол φ и $\cos\varphi$ могут быть определены без всяких подсчетов только с помощью циркуля.

Построение показано на фиг. 110. Откладывают $Oa = P_1$ и $Ob = P_2$, или, при одинаковой постоянной приборов, прямо α_1 и соответственно α_2. На ab строят равносторонний треугольник abc, тогда $\measuredangle\, cOb = \varphi$, так как

$$tg\,(cOb) = \frac{ce}{Oc} = \frac{\frac{P_2 - P_1}{2} \cdot \sqrt{3}}{P_1 + \frac{P_2 - P_1}{2}}$$

или

$$tg\,(cOb) = \sqrt{3} \cdot \frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1}.$$



Фиг. 110.

Чтобы иметь возможность непосредственно определять $\cos\varphi$, чертят, так называемый, круг единиц (например, $01 = 100$ *mm.*) и продолжают Oc до d, тогда $fd = Og = \cos\varphi$.

Другое графическое выражение этой формулы предложил Х а й д е г г е р (Haidegger) [14]).

При большом числе отсчетов желательно иметь таблицу, из которой можно было бы определять $\cos\varphi$ непосредственно по значениям P_1 и P_2. Эту таблицу можно получить следующим образом:

обозначив $\frac{P_1}{P_2} = tg\,\beta = b$ и $tg\,\varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{\cos\varphi}$,

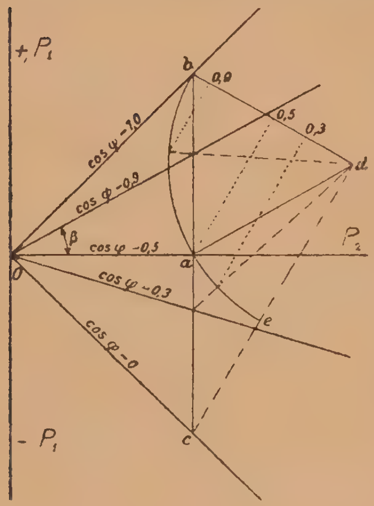
получим в преобразованном виде уравнение:

$$\cos\varphi = \frac{1+b}{2\cdot\sqrt{1-b+b^2}},$$

т.-е., $\cos\varphi$ есть функция отношения $\frac{P_1}{P_2}$ или угла β, который лежит

в пределе $+45°$ и $-45°$. При построении идут обратным путем, откладывая для различных значений $\cos\varphi$, соответствующие $\sphericalangle\beta$, как это показано на фиг. 111.

В прямоугольной системе координат, осями которой служат P_2 (горизонтальной) и P_1 (вертикальной) откладывают Oa, равное единице. На перпендикуляре в точке a вверх откладывают $P_1 = ab = Oa$, и вниз — $P_1 = ac = Oa$, тогда луч Ob определит $\cos\varphi = 1$, так как $tg\,(aOb) = tg\,\beta = tg 45°$ или $b = 1$. Луч Oc определит $\cos\varphi = 0$, так как $tg\ aOc = -tg\,\beta = tg\,(-45°)$ или $b = -1$. Oa направление для $\cos\varphi = 0{,}5$, так как при этом $P_1 = 0$ и потому $tg\,\beta = 0$. Затем строят на ab равносторонний треугольник abd, тогда $bd = Oa = P_2$ и круг очерченный из d радиусом bd, проходящий через a и e, будет кругом единиц фиг. 110. Если теперь желают построить лучи для 0,9; 0,8; 0,7 или промежуточных значений, то делят соответственно bd, восставляют перпендикуляр и найденную точку круга единиц соединяют лучем с d; этот луч пересечет линию cb в некоторой точке, — прямая, соединяющая последнюю с точкой O, и будет лучем для соответствующего $\cos\varphi$ (на чертеже это построение сделано для $\cos\varphi = 0{,}9$ и $\cos\varphi = 0{,}3$). Эти лучи тщательно вычерчивают на миллиметровой бумаге, чтобы иметь возможность удобно и быстро наносить значения P_2 и P_1. Каждому значению P_2 и P_1 соответствует одна точка, положение которой на луче дает возможность отсчитать $\cos\varphi$.



Фиг. 111.

Другой метод дал Радке (Radtke) [15].

Если изобразить в прямоугольной системе координат [16] уравнение

$$\cos\varphi = \frac{1+b}{2\cdot\sqrt{1-b+b^2}}$$

как функцию от $\pm b$, то можно из симметричной по отношению к оси абсцисс кривой $f\,(\cos\varphi,\ b)$ определить ординату $\cos\varphi$ для найденного измерением отношения $\frac{P_1}{P_2} = b$.

При неравномерной нагрузке фаз нельзя уже говорить о коэффициенте мощности многофазной системы, а нужно определять коэффициент мощности отдельных фаз. В этом случае в каждой фазе необходим уаттметр, что, однако, особенно при высоком напряжении, требует сложного оборудования и устройства искусственной нулевой точки. По Соважу (Sauvage) [17], три фазовые угла трехфазной

системы можно определить, только двумя уаттметрами, следующим образом:

Измеряют согласно фиг. 105, 107 и 109

1. Силу тока $i_1 = J_1$; напряжение E_2; мощность $P_1 = E_2 \cdot i_1 \cdot \cos\alpha$.

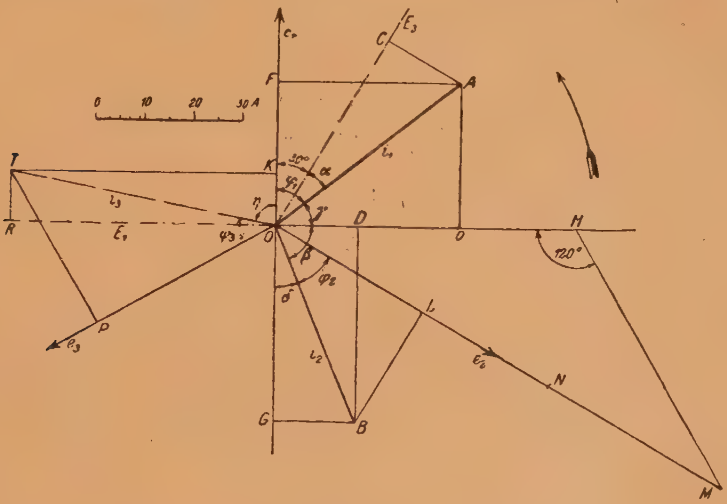
2. „ „ $i_2 = J_2$; „ E_1; „ $P_2 = E_1 \cdot i_2 \cdot \cos\beta$.

3. „ „ $i_1 = J_1$; „ E_1; „ $P_3 = E_1 \cdot i_1 \cdot \cos\gamma$,

при этом катушка напряжения первого уаттметра включена под напряжение E_1 между фазами 2 и 3.

4. Силу тока $i_3 = J_3$ для проверки (необязательно).

Затем строят в прямоугольной системе координат (фиг. 112), исходя от напряжений e_1, e_2, e_3, сдвинутых по отношению друг к другу на 120°, — силу тока $i_1 = OA$ под углом γ к E_1 (абсциссе), тогда определяется также и $\varphi_1 = 90° - \gamma = 30° + \alpha$, откуда можем проверить



Фиг. 112.

α, определенное из первого измерения. Затем строят $i_2 = OB$ под углом $\beta = \varphi_2 + 30°$, что определит $\sphericalangle \varphi_2$ между e_2 и i_2. Опустив перпендикуляры AC и BD, получим $OC = i_1 \cdot \cos\alpha = \frac{P_1}{E_2}$ и $OD = i_2 \cdot \cos\beta = \frac{P_2}{E_1}$.

Построив $DH = OC$, найдем $OH = \frac{P_1}{E_2} + \frac{P_2}{E_1} = \frac{P}{E}$ величину для общей мощности, если принять $E_1 = E_2 = E_3 = E$. Но для мгновенных значений, которые можно изобразить в виде проэкций векторов тока на любую прямую (напр., ось ординат), имеем:

$$i_{1t} + i_{2t} + i_{3t} = i_1 \cdot \cos\varphi_1 - i_2 \cdot \cos\delta \pm i_3 \cdot \cos\eta = OF - OG \pm OK = O.$$

Отсюда найдем $\pm OK = OG - OF$.

С другой же стороны, имеем отношения:

$$P = \frac{E}{\sqrt{3}} \cdot (i_1 \cdot \cos\varphi_1 + i_2 \cdot \cos\varphi_2 + i_3 \cdot \cos\varphi_3).$$

Опустим перпендикуляр BL на e_2, тогда $OL = i_2 \cdot \cos\varphi_2$ и $OF = i_1 \cdot \cos\varphi_1$. Подставив еще $\frac{P}{E} = OH$, получим $i_3 \cdot \cos\varphi_3 = OH \cdot \sqrt{3} - (OL + OF)$. Проведя из H прямую под углом $\sphericalangle 120°$, которая пересечет продолжение OL в M, найдем $OM = OH \cdot \sqrt{3} = \frac{P}{E} \cdot \sqrt{3}$. Взяв $LN = OF$, получим $NM = i_3 \cdot \cos\varphi_3$.

На направлении вектора e_3 отложим $OP = NM$. Восставим в P перпендикуляр и проведем через K прямую, параллельную оси абсцисс— она пересечется с перпендикуляром в T. Таким образом находим $OT = i_3$ и $\sphericalangle TOP = \varphi_3$. Если опустим перпендикуляры AV и TR, то получим $OR = OD + OV$.

Фиг. 112 построена для $P_1 = 134$ kW, $P_2 = 50$ kW, $P_3 = 112$ kW, $E = 3000$ V, $i_1 = 48$ A, $i_2 = 44$ A, откуда $i_3 = 55$ A, $\cos\varphi_1 = 0{,}626$ $(51^0\,15')$, $\cos\varphi_2 = 0{,}788$ (38^0), $\cos\varphi_3 = 0{,}751$ $(41^0\,20')$ и $P = P_1 + P_2 = \frac{106 \cdot 3000}{\sqrt{3}} = 184$ kW.

в. Метод трех вольтметров.

Для измерения мощности можно также воспользоваться вышеназванным методом, предложенным Свинбэрном (Swineburne[17]), Эйртоном (Ayrton) и Земпнером (Sumpner). Для такого измерения включают нагрузку A (фиг. 113) последовательно с известным постоянным безиндукционным сопротивлением R_1 к источнику переменного тока E_3. Затем измеряют три напряжения E_1, E_2 и E_3. Тогда для мгновенных значений будем иметь:

$$E_{1t} + E_{2t} = E_{3t}.$$

После возведения в квадрат получим:

$$E^2_{1t} + E^2_{2t} + 2E_{1t} \cdot E_{2t} = E^2_{3t}$$ или, так как $E_1 = J_1 \cdot R_1$,

то

$$2J_{1t} \cdot R_1 \cdot E_{2t} = E^2_{3t} - E^2_{1t} - E^2_{2t}.$$

Проинтегрировав найдем:

$$2 \cdot R_1 \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T J_{1t} \cdot E_{2t} \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E^2_{3t} \cdot dt - \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E^2_{1t} \cdot dt - \frac{1}{T} \cdot \int_0^T E^2_{2t} \cdot dt$$

или

$$2\,R_1 \cdot P = E^2_3 - E^2_1 - E^2_2,$$

откуда может быть вычислена мощность, потребляемая в A:

$$P = \frac{E^2_3 - E^2_1 - E^2_2}{2R_1}$$

Решим эту же задачу графически. Отложим от направления вектора тока J, как от основной линии, отдельные напряжения по величине и фазе, как это показано на фиг. 114. E_1 при этом в фазе с J, E_2 сдвинуто по отношению к J на $\measuredangle\varphi$ и E_3 определится, как геометрическая сумма E_1 и E_2, замыкающей линией диаграммы. На основании полученной диаграммы можем написать следующее отношение:

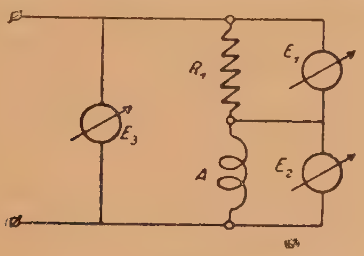
$$E^2_3 = E_1^2 + E^2_2 + 2E_1 . E_2 . \cos\varphi.$$

Подставив $$E_1 = J \cdot R_1,$$

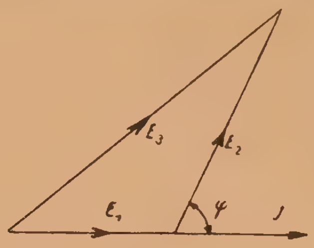
получим: $E^2_3 = E^2_1 + E^2_2 + 2R_1 \cdot J \cdot E_2 \cdot \cos\varphi = E^2_1 + E^2_2 + 2R_1 \cdot P$

или $$P = \frac{E^2_3 - (E^2_1 + E^2_2).}{2R_1}$$

Этот метод несколько непрактичен в том отношении, что, кроме неудобства повышенного напряжения E_3, регулируемое безиндукционное



Фиг. 113.



Фиг. 114.

сопротивление для сильных токов дорого и громоздко. Это включение, однако, удобно для измерения мощности, потребляемой катушкой напряжения счетчика; при таком измерении в качестве вольтметра нужно пользоваться электростатическим прибором [18]).

Удобнее же следующий, предложенный Флемингом (Fleming)

с. Метод трех амперметров.

В этом случае безиндукционное сопротивление R_1 включают параллельно нагрузке A (фиг. 115). Тогда в любое мгновение:

$$J_{3t} = J_{1t} + J_{2t}$$

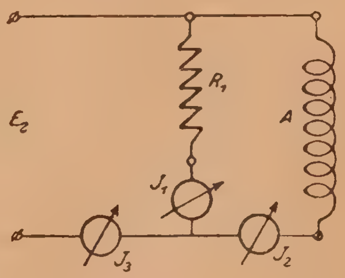
или по возведении в квадрат:

$$J^2_{3t} = J^2_{1t} + J^2_{2t} + 2J_{1t} \cdot J_{2t} =$$

$$= J^2_{1t} + J^2_{2t} + 2\frac{E_{2t}}{R_1} . J_{2t} ,$$

так как

$$J_{1t} = \frac{E_{2t}}{R_1} .$$

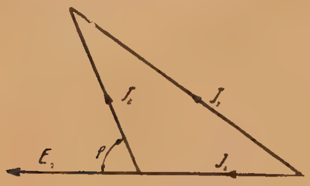


Фиг. 115.

После интегрирования и преобразования или соответственно из диаграммы (фиг. 116), получим мощность:

$$P = \frac{R_1}{2} \cdot \left[J^2_3 - \left(J^2_1 + J^2_2\right)\right] .$$

Оба эти метода могут дать тем большую ошибку, чем больше угол сдвига фаз φ между током и напряжением в нагрузке. Кроме того, наиболее точный результат получим, если подберем $E_1 = E_2$, или соответственно $J_1 = J_2$, а тогда измерение связано с большой затратой энергии. Эти измерения можно упростить, определяя измерением только сумму и разность напряжений E_1 и E_2, или же, наконец, применив для измерения обоих напряжений один дифференциальный вольтметр [19]).



Фиг. 116.

Для определения **коэффициента мощности** цепи переменного тока, можно, как это предложил Люлофс (Lulofs) [20]), пользоваться уаттметром с индукционной катушкой в цепи напряжения.

Для измерений при высоком напряжении (30.000 вольт) особенно удобен уаттметр Дуддель-Мотера (Duddel-Mather) [21]).

[1]) Helios 373 (1909). [2]) ETZ. 489 (1909). [3]) ETZ. 53 (1913). [4]) ETZ 193 (1892). [5]) Görges, ETZ. 213 (1891. [6]) Bragstad, ETZ. 252 (1900). [7]) ETZ. 215 (1901). [8]) ETZ. 267 (1901); 976 (1903). [9]) ETZ. 71 (1907). [10]) ETZ. 575 (1893). [11]) Сравн. ETZ. 120 (1899); 111, 193, 993 (1903); Ind. El. 437 (1909). [12]) El. u. M. Wien. 987 (1907). [13]) El. u. M. Wien. 109 (1908). [14]) ETZ. 335 (1918). [15]) El World. 120 (1907); Ann. d. El. 398 (1907). ETZ. 1177 (1907). [16]) ZfE. (18) (1903); El. u. M. Wein. 12 (1907); ETZ. 336 (1918). [17]) ETZ. 712 (1913). [18]) ETZ. 98 (1901). [19]) ETZ. 221 (1902). [20]) ETZ. 227 (1908). [21]) ETZ. 1098 (1912).

32 *. Электрические счетчики.

Работа в цепи электрического тока выражается формулой:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} e \cdot i \cdot dt,$$

где e и i мгновенные значения напряжения и силы тока. Если взять вместо них эффективные значения, то нужно еще ввести коэффициент мощности:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} E \cdot J \cdot \cos\varphi \cdot dt.$$

Это уравнение относится к постоянному и к переменному токам, только для первого $\cos\varphi$ равен единице и выпадает.

Для непосредственного измерения этой работы служат электрические счетчики, при чем, если они измеряют работу в уаттчасах, их называют **счетчиками уаттчасов** (или соответственно **гекто- и килоуаттчасов**).

Если при постоянном токе E в цепи постоянно, то

$$A = E \cdot \int_{t_1}^{t_2} J \cdot dt$$

и достаточно измерять $\int_{t_1}^{t_2} J \cdot dt$, для чего служат **счетчики**.

амперчасов; если постоянна сила тока, а переменно E, то

$$A = J \cdot \int_{t_1}^{t_2} E \cdot dt\,,$$

в этом случае применяют счетчики вольтчасов.

Если постоянны и напряжение и нагрузочная сила тока, то

$$A = E \cdot J \cdot \int_{t_1}^{t_2} dt\,,$$

т.-е. достаточно знать только продолжительность включения нагрузки; в этих случаях пользуются счетчиками времени. Обычно это простые часовые механизмы, пускаемые в ход и останавливаемые электромеханическим воздействием при включении и выключении нагрузки.

Наконец, существует ряд счетчиков специального назначения; например, счетчики безуаттной мощности переменного тока

$$A = \int_{t_1}^{t_2} E \cdot J . \sin\, \varphi \cdot dt.$$

В известном смысле счетчиками можно назвать регистрирующие уаттметры, амперметры и вольтметры.

Благодаря тому, что электрический счетчик есть прибор массового обихода, существует громадное количество различных конструкций счетчиков и их теории посвящен ряд обстоятельных работ[1]).

Основные группы, на которые можно разбить электрические счетчики, следующие:

1) Моторные счетчики.
2) Маятниковые счетчики.
3) Электрохимические счетчики.

В настоящее время моторные счетчики почти вытеснили из практики все другие.

1) Моторные счетчики.

Так называют непрерывно регистрирующие электрические счетчики с вращательным движением. Работа, производимая якорем счетчика, поглощается токами Фуко, индуктируемыми в металлическом диске, который вращается между полюсами постоянного магнита. Эту группу составляют следующие системы:

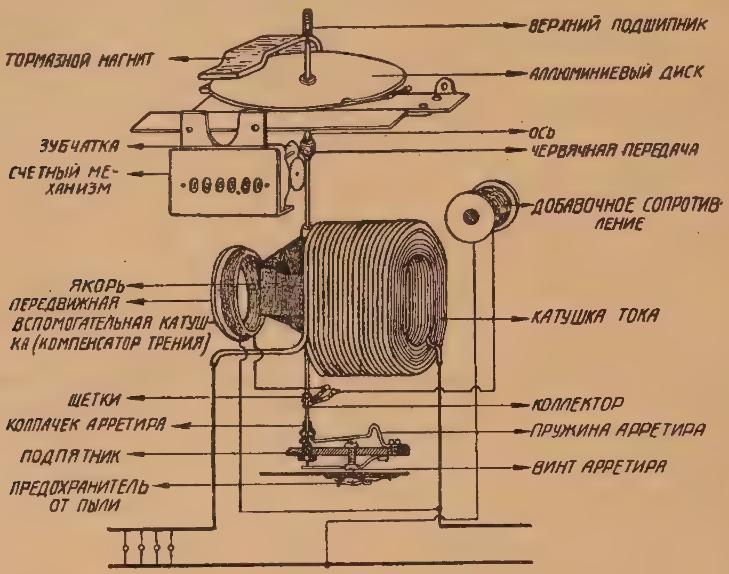
а) электродинамические счетчики,
в) магнитомоторные счетчики и
с) индукционные счетчики.

а) Электродинамические счетчики.

Приборы этой системы основаны на принципе взаимодействия двух проводников с токами. Обычно электродинамические счетчики имеют неподвижную катушку (чаще две) из толстой проволоки, включенную в цепь последовательно, и подвижную тонкую катушку (якорь), включенную в цепь параллельно (шунтовая катушка). Приборы этой

системы пригодны для постоянного и переменного тока, но в настоящее время употребляются почти исключительно для постоянного тока,—индукционный счетчик для переменн. тока значительно дешевле. Примером электродинамического счетчика уаттчасов постоянного тока может служить прибор фирмы *A. E. G.*, показанный схематически на фиг. 117. Надписи на чертеже достаточно поясняют детали конструкции. Рассмотрим общие принципы работы такого счетчика.

Нагрузочный ток J протекает через неподвижную катушку и создает одно магнитное поле; ток в якоре $J_я$, пропорциональный напряжению E создает второе магнитное поле, которое стремится стать по направлению поля неподвижной катушки и вызывает вращение якоря. Ток $J_я$ подводится в якорь через серебряные щетки и коллектор. Последовательно с якорем включены



Фиг. 117.

вспомогательная катушка (компенсатор трения) и добавочное сопротивление. Ток в якоре должен быть возможно меньше, чтобы свести к минимуму потребление мощности в шунтовой цепи и уменьшить износ коллектора. На ось якоря надет алюминиевый диск, вращающийся между полюсами постоянного магнита; на одной стороне этого диска в радиальном направлении укреплен крючек из тонкой железной проволоки (не показан на чертеже). Постоянный магнит защищен железным экраном от действия поля катушек тока.

Если не принимать во внимание действия компенсатора трения, то вращающий момент, действующий на якорь, будет

$$M_{вр} = K_1 \cdot J_я \cdot J = K_2 \cdot \frac{E}{R_я} \cdot J = K_3 \cdot P \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (1)$$

где $R_я$ — сопротивление всей цепи якоря, K — постоянные коэффициенты.

Токи Фуко в диске

$$J_ф = K_4 \cdot Ф_м \cdot \vartheta \cdot \lambda \cdot n\ ,$$

где $Ф_м$ — поток постоянного магнита, ϑ — толщина и λ — удельная

проводимость диска; n — число оборотов в минуту. Тормозящий момент пропорционален произведению $J_ф \cdot \Phi_м$, следовательно

$$M_{торм.} = K_5 \cdot J_ф \cdot \Phi_м = K_6 \cdot \Phi^2_м \cdot \vartheta \cdot \lambda \cdot n = K_7 \cdot n\,, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

т.-е. тормозящий момент прямо пропорционален числу оборотов в минуту. Постоянную торможения K_7 можно регулировать, переставляя постоянный магнит.

Шунтовую цепь счетчика уаттчасов всегда следует включать как катушку напряжения уаттметра на схеме фиг. 99,—счетчик всегда регистрирует работу в нагрузке, плюс работу, потребляемую в катушке тока счетчика. Включать счетчик по схеме фиг. 98 нельзя, так как в этом случае он будет вращаться и при отсутствии нагрузки у потребителя.

Когда счетчик включен в цепь, то его якорь, под действием вращающего момента $M_{вр}$, начнет вращаться, увеличивая число оборотов до тех пор, пока при некотором числе оборотов n не будет достигнуто равновесие

$$M_{вр.} = M_{торм.}$$

на основании формул (1) и (2)

$$n = \frac{K_3}{K_7} \cdot P = K_8 \cdot P\,.$$

Число оборотов якоря счетчика в минуту пропорционально мощности, потребляемой в нагрузке, а показания его счетного механизма — работе.

Ошибка счетчика выражается уравнением

$$f = \frac{A - A_{ист.}}{A_{ист.}} \cdot 100 = \left(\frac{A}{A_{ист.}} - 1 \right) \cdot 100\%\,,$$

где A — показание прибора и $A_{ист.}$ — действительное потребление в нагрузке.

В вышеприведенной формуле вращающего момента не принято во внимание влияние трения. В рассматриваемом счетчике имеется трение щеток о коллектор, трение осей в подпятниках, трение о воздух и трение в счетном механизме. Момент сил трения $M_{тр.}$ уменьшает вращающий момент

$$M_1 = M_{вр.} - M_{тр.}$$

и этим нарушает пропорциональность между числом оборотов и мощностью потребляемой в цепи.

Ошибка, вызываемая влиянием трения

$$f_{тр.} = \frac{M_1 - M_{вр.}}{M_{вр.}} \cdot 100\% = -\frac{M_{тр.}}{M_{вр.}}\,100\%\,.$$

Из этой формулы ясно, что с уменьшением нагрузки (и следовательно $M_{вр.}$) ошибка возрастает; вместе с тем, благодаря влиянию трения ухудшается чувствительность счетчика, т.-е. при малых нагрузках якорь не вращается.

Чтобы улучшить работу счетчика пользуются, по предложению Гуммеля, так называемым компенсатором трения. В рассматриваемом счетчике это катушка, включенная последовательно с якорем; она создает магнитное поле, пропорциональное силе тока в якоре $J_я$

и так как в якоре протекает тот же ток $J_я$, то вспомогательный вращающий момент, действующий на якорь, будет

$$M_{всп.} = K_9 \cdot J^2_я = K_9 \cdot \frac{E^2}{R^2_я}.$$

Как видим этот момент пропорционален квадрату напряжения. Вспомогательную катушку можно передвигать, приближая и удаляя от якоря, и тем менять $M_{всп.}$. Благодаря действию компенсатора трения, вращающий момент, действующий на якорь, будет

$$M_{дейст.} = M_{вр.} - M_{тр.} + M_{всп.}$$

и ошибка счетчика, по сравнению с идеальным счетчиком без трения и вспомогательной катушки,

$$f = \frac{M_{всп.} - M_{тр.}}{M_{вр.}} \cdot 100\%.$$

Если бы $M_{тр.}$ не зависел от скорости вращения якоря, то можно было дать $M_{всп.} = M_{тр.}$ и тем самым заставить счетчик работать правильно, но $M_{тр.}$ не постоянен и не может быть точно скомпенсирован для любой погрузки постоянным $M_{всп.}$. Небольшая ошибка при малых нагрузках неизбежна, поэтому $M_{всп.}$ регулируется так, чтобы

$$M_{всп.} \cong M_{тр.}$$

при нормальной нагрузке счетчика.

Если в процессе работы счетчика увеличился $M_{всп.}$ или уменьшилось трение, то счетчик может пойти „самоходом“, т.-е. без нагрузочного тока, под действием лишь одного напряжения. $M_{всп.}$ может увеличиться, если счетчик включен под напряжение выше того, для которого он предназначался, $M_{тр.}$ может уменьшиться, вследствие сотрясений стены, на которой укреплен счетчик.

Чтобы устранить возможность самохода счетчика, на ось или на тормазной диск укрепляют радиально направленный кусок железной проволоки. Постоянный магнит притягивает проволоку и препятствует самоходу. Чтобы отрегулировать этот тормазной крючек, счетчик без нагрузочного тока включают под напряжение, превышающее нормальное на 20%, затем, слегка постукивая по счетчику загибают конец железной проволочки так, чтобы при легком повороте диска и с ним крючка из нулевого положения постоянный магнит притягивал его на прежнее место. Тормазной крючек не изменяет среднего вращающего момента, он только создает небольшую неравномерность вращающего момента, уменьшая его, когда, по мере вращения диска, он удаляется от постоянного магнита и увеличивая $M_{дейст.}$, когда он приближается к магниту.

При вращении якоря счетчика в нем возникает некоторая противоэлектродвижущая сила E', пропорциональная числу оборотов n; учитывая ее влияние, силу тока в якоре нужно определять по формуле

$$J_я = \frac{E - E'}{R_я},$$

влияние E' будет нарушать правильность работы счетчика. В современных электродинамических счетчиках E' так мало (не свыше 0,2%), что им можно пренебречь по сравнению с E.

При изменении температуры изменяется сопротивление алюминиевого тормазного диска, а следовательно и тормозящий момент. Чтобы не изменилось число оборотов в минуту, нужно, чтобы

в такой же мере изменилось сопротивление цепи якоря. Это сопротивление составляют сопротивление меди якоря (температурный коэфф. 0,004 почти равен темп. коэфф. алюминия) и добавочное сопротивление. Последнее составляют частично из никкеля (темпер. коэфф. 0,006) и остальную часть из константана.

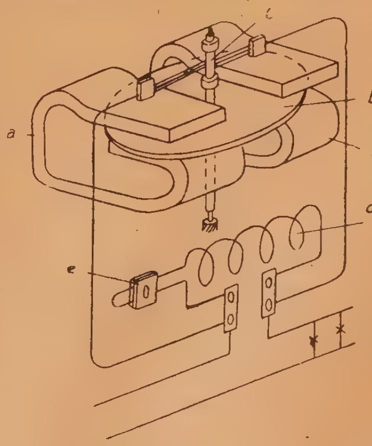
С изменением температуры несколько изменяется и $\Phi^2_м$, уменьшаясь с увеличением температуры приблизительно на 0,1%—на 1°C.

Благодаря относительной слабости магнитного поля электродинамического счетчика, на его показания оказывают сильное влияние внешние магнитные поля. Чтобы уменьшить это влияние нужно создать возможно более сильное неподвижное магнитное поле, —поле катушек тока. *Р. Т. R.* требует, чтобы при нормальном токе $H_J \geqq 100$ гауссов.

На электродинамическом принципе основаны и ферродинамические счетчики [2]). Счетчики этой системы состоят из электромагнита, с небольшим зазором, в котором вращается плоский якорь (такого же типа, как якорь счетчика амперчасов на фиг. 118). Благодаря влиянию остаточного намагничивания, нельзя создавать неподвижное поле нагрузочным током, так как тогда это поле не будет изменяться пропорционально нагрузке [3]). Поэтому для возбуждения электромагнита приходится пользоваться током шунтовой цепи, пропорциональным E и малоизменяющимся при работе прибора. Нагрузочный ток пропускают через шунтированный якорь. В этом случае большое неудобство в работе прибора представляет непостоянство сопротивления контакта щеток, нарушающее соотношение тока в шунте и в якоре.

b) Магнитомоторные счетчики.

Счетчики этой системы работают по принципу моторов постоянного тока, причем их поле возбуждения создается постоянными магнитами; в поле последних вращается катушка-якорь, в которую через коллектор и щетки подводится ток, пропорциональный рабочему току или напряжению. В силу такой конструкции счетчики этой системы могут служить только в качестве счетчиков ампер-или вольтчасов постоянного тока. На фиг. 118 схематически показано устройство счетчика амперчасов магнитомоторной системы фирмы Paul Firchow, Berlin [7]).



Фиг. 118.

В узком воздушном зазоре двух постоянных магнитов *a* вращается дискообразный якорь *b*, он состоит из трех, соединенных последовательно катушек, помещенных внутри алюминиевого полого диска. Эти катушки соединены с коллектором *c*, щетки которого включены параллельно шунту *d*; через последний и проходит бо́льшая часть тока. Ось якоря снабжена червячной передачей, и от нее работает счетный механизм (не показаны на чертеже). При постоянном напряжении этот счетчик может быть проградуирован в килоуаттчасах. Регулировать работу счетчика можно, передвигая мостик *e* в шунте.

Обозначим через $R_ш$ сопротивление шунта и через $R_я$ сопротивление цепи якоря, тогда напряжение на клеммах счетчика будет

$$e = J \cdot \frac{R_ш \cdot R_я}{R_ш + R_я} .$$

Сопротивление якоря слагается из следующих отдельных сопротивлений: сопротивления обмотки якоря, сопротивления подводящих проводников и щеток, и сопротивления контакта щеток. Последнее не велико, но меняется. Чем меньше все сопротивление цепи якоря, тем больше влияние сопротивления контакта щеток на ток в якоре и тем самым на показания счетчика. Но чем больше сопротивление якоря, тем меньше, при данном напряжении на клеммах прибора, ток в якоре и тем меньше вращающий момент.

При вращении якоря в поле постоянного магнита, в нем возникает противоэлектродвижующая сила

$$e' = K_1 \cdot n ,$$

скорость вращения якоря с большим приближением пропорциональна нагрузочному току и обратно пропорциональна магнитному потоку, на основании чего

$$e' = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{J}{\Phi_м} = K_3 \cdot J .$$

Ток в якоре $$i_я = \frac{e - e'}{R_я} ,$$

ток в шунте $$i_ш = \frac{e}{R_ш} ,$$

нагрузочный ток $$J = i_ш + i_я ,$$

на основании чего напряжение на клеммах прибора

$$e = i_я R_я + e' = J \cdot \frac{R_ш \cdot R_я + K_3 \cdot R_ш}{R_ш + R_я}$$

и ток в якоре $$i_я = J \cdot \frac{R_ш - K_3}{R_ш + R_я} ,$$

т.-е. противоэлектродвижущая сила якоря в счетчике амперчасов не нарушает пропорциональности между током в якоре и нагрузочным током.

Тормозящий момент создается токами Фуко в диске так же, как для электродинамического счетчика

$$M_{тор.} = K_4 \cdot \Phi^2_м \cdot n ;$$

при условии установившегося числа оборотов, вращающий и тормозящий моменты равны

$$K_5 \cdot \Phi_м \cdot i_я = K_4 \cdot \Phi^2_м \cdot n ;$$

откуда $$n = i_я \cdot \frac{K_6}{\Phi_м} = J \cdot K_6 \cdot \frac{R_м - K_3}{(R_ш + R_я) \cdot \Phi_м} = J \frac{K_7}{\Phi_м} .$$

Из этого уравнения видим, что число оборотов счетчика амперчасов пропорционально нагрузочному току J и обратно пропорционально потоку постоянных магнитов $\Phi_м$.

Так как подвижная система счетчика амперчасов очень легка, то в большинстве современных счетчиков приспособления для компенсации трения не имеется. Однако, в некоторых конструкциях момент трения компенсируется по одному из следующих способов:

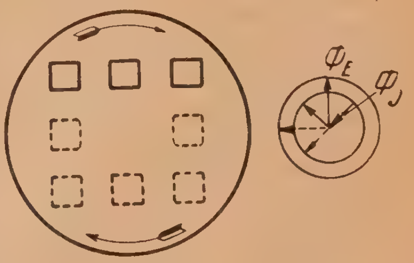
1) Параллельно нагрузке включают большое сопротивление; ток, протекающий это сопротивление проходя через якорь счетчика, создает небольшой вспомогательный момент [4]). Недостаток этого способа тот, что создается постоянное потребление энергии в шунтирующем сопротивлении.

2) По мере увеличения нагрузочного тока уменьшается влияние трения на скорость вращения якоря. Можно, при увеличении силы тока, в такой же мере уменьшать вращающий момент счетчика. Для этого нужно изменять место коммутации, в зависимости от силы тока. При коммутации в нейтральной зоне средний вращающий момент достигает максимума, при запаздывании или опережении коммутации он уменьшается. Место коммутации делают зависящим от нагрузочного тока, при малой нагрузке коммутация происходит правильно, по мере увеличения нагрузки коммутация начинает запаздывать или опережать. Приспособление для изменения места коммутации очень просто: пластины коллектора делают не параллельными оси, а с небольшим винтовым ходом по отношению к оси; щеткодержатели же заставляют передвигаться вверх и вниз по направлению оси коллектора в зависимости от силы тока. Этим приспособлением одновременно достигается большое уменьшение износа коллектора и щеток [5]).

В ртутных магнитомоторных счетчиках якорь, в виде диска или колокола, плавает в ртути между полюсами постоянных магнитов [6]). Ток подводится через два противолежащие контакта в ртуть, а через ртуть в якорь. Большое преимущество счетчиков этого типа—отсутствие коллектора и щеток, недостаток же—их высокая стоимость.

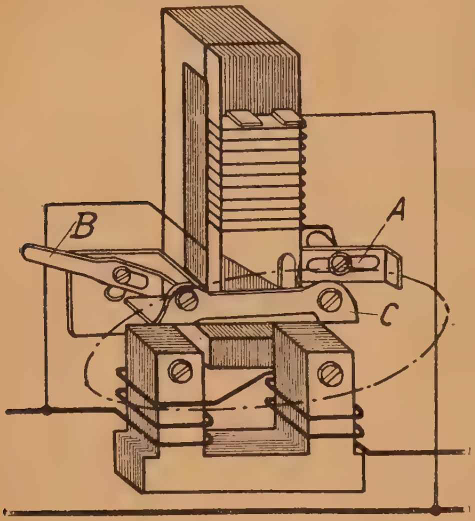
c) Индукционные счетчики.

В основу конструкции современных индукционных счетчиков положен принцип так называемого *блуждающего поля*. Выше (§ 1) был изложен принцип устройства приборов Феррариса — с вращающимся магнитным полем. Эти приборы, по существу представляют собой 4-хполюсный двухфазный мотор с короткозамкнутым ротором. Счетчики с блуждающим полем представляют собой такой же двухфазный мотор, но многополюсный, причем налицо у них только *часть полюсов*. Роль ротора в них играет алюминиевый диск (показан пунктиром на фиг. 120). На фиг. 119 и 120 схематически показано расположение полюсов и общий вид такого счетчика уаттчасов, соответствующего восьмиполюсному мотору, при чем налицо только три полюса статора,—пять полюсов отсутствуют. Через катушки двух крайних электромагнитов протекает рабочий ток, через катушку среднего электромагнита протекает ток, пропорциональный напряжению сети.



Фиг. 119.

Катушка напряжения возбуждает поток Φ_E, отстающий по фазе от напряжения сети на 90°; ток в двух других катушках возбуждает поток Φ_J; таким образом при равенстве фаз напряжения и тока в сети поток Φ_E отстает от потока Φ_J на угол $\Psi = 90°$ (как получить $\Psi = 90°$ разберем ниже). На фиг. 121 показано, с одной стороны, вращение соответствующих векторов магнитной индукции нашей системы и, с другой, изменение по времени этих полей в пространстве (для простоты выраженных в виде заштрихованных прямоугольников). Как видим, оба поля — положительное и отрицательное — перемещаются слева направо („блуждают“), при этом они увлекают за собою диск счетчика. Центры тяжести положительного магнитного поля соединены прямыми линиями. Наклон этих линий к горизонтальной прямой характеризует относительную скорость движения поля за взятые промежутки времени (при условии равенства этих промежутков),—как видим, поле перемещается с мало изменяющейся скоростью.



Фиг. 120.

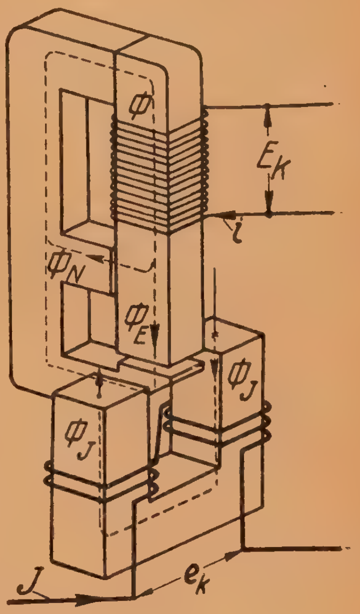
Фиг. 121.

Теперь сравним вращающий момент индукционного счетчика с вращающим моментом нормального мотора. Диск счетчика соответствует коротко замкнутому ротору с относительно большим сопротивлением. Такой ротор придает мотору характерное свойство—его вращающий момент достигает своей наибольшей величины при остановке (или в момент пуска) мотора и уменьшается по мере увеличения числа оборотов [8]). Диск счетчика можно тормозить посредством токов Фуко индуктируемых в нем постоянным магнитом (не показан на чертежах), так, чтобы равновесие вращающего и тормозящего моментов наступало при очень малом числе оборотов (т.-е. при большом скольжении). Для взятого нами 8-миполюсного мотора, при частоте 50, синхронная скорость будет 750 оборотов в минуту, а наш счетчик будет работать с числом оборотов от 35 до 70, т.-е. со скольжением 95 — 90%.

Остановимся теперь на способе получения сдвига потока Φ_E по фазе в отношении потока Φ_J ровно на 90°. Электромагнит, включаемый под напряжение сети, должен работать при высокой индукции, так как ток в его катушке должен быть возможно меньше и отставать на воз-

можно больший угол от напряжения сети, чтобы, с одной стороны, уменьшить свою уаттную составляющую, а с другой, облегчить задачу получения сдвига потоков Φ_E и Φ_J на 90°.

В катушках рабочего тока, напротив, индукция должна быть мала, чтобы их поток, по возможности был в фазе с рабочим током и изменялся пропорционально ему. Следовательно, магнитопровод катушки напряжения должен обладать очень малым магнитным сопротивлением, магнитопровод же катушек тока — большим.



Фиг. 122.

Поэтому магнитные потоки Φ_E и Φ_J не должны иметь общего магнитопровода (как это имело место в старых конструкциях), что осуществляется посредством взаимоперпендикулярного расположения систем (фиг. 120 и 122). На фиг. 123 дана векториальная диаграмма счетчика. Катушка напряжения, включенная под напряжение $E_к$, возбуждает поток Φ (фиг. 122). Этот поток делится на больший, не моторный поток в магнитном шунте Φ_N и меньший, моторный, Φ_E. Путь первого почти полностью проходит через железо, оставляется только маленький воздушный зазор около 0,5 *mm*; этим достигается высокая индукция в цепи всего потока Φ и малое потребление мощности, что на диаграмме выражено сдвигом вектора тока i в катушке напряжения, приблизительно на 80°. Поток Φ_N находится в фазе со своим намагничивающим током $i\mu_N$, последний же почти в фазе с i и только маленький ток i_{hN}, идущий на покрытие потерь в железе шунтового потока, слегка сдвигает его по фазе. Ток i_{hN} находится в фазе с $E_к$.

Хотя большая часть потока Φ проходит через магнитный шунт, однако, остающийся поток Φ_E, замыкающийся через диск, вполне достаточен для работы вращающейся системы, а благодаря магнитному шунту достигается 90°-ный сдвиг. Напомним, что этот сдвиг нам нужен, для получения вращающего момента пропорционального $E \cdot J \cdot cos\varphi$, а не $E \cdot J \cdot sin\varphi$ (см. § 1 и § 31 теория индукционных приборов).

Рабочий ток возбуждает U образный электромагнит, помещенный под диском; большая часть пути его магнитного потока проходит при этом через воздух. Напряжение $E_к$, под которое включена катушка среднего электромагнита, можно рассматривать как почти постоянное, следовательно поток Φ_E почти не изменяется и нет влияния изменения магнитной проницаемости железа. Напротив, для катушек тока — поток Φ_J изменяется вместе с током J от нуля до соответствующей нормально нагрузки данного счетчика. Если бы магнитная цепь потока Φ_J была замкнута, то при изменении силы тока, вследствие переменной величины магнитной проницаемости, магнитный поток Φ_J изменялся бы не пропорционально току, но благодаря тому, что в магнитную цепь включен большой воздушный зазор с постоянной магнитной проницаемостью ($\mu = 1$), — изменения μ железа почти не отражаются на общем сопротивлении магнитопровода катушек рабочего тока. Поток Φ_J относительно мал и приблизительно лишь вдвое больше числа намагничивающих ампервитков, число же последних, при нормальной силе

тока равно обычно 200. Вследствие незначительной величины магнитной индукции в магнитопроводе потока Φ_J, потери в железе незначительны, а, следовательно незначителен и ток J_h, идущий на покрытие их. Этот ток в фазе с падением напряжения e_k в катушках тока (фиг. 122 и 123). Благодаря малой величине Φ_j мал и вторичный ток J_2, индуктируемый им в диске. Поток Φ_J, находясь в фазе с намагничивающим током J_μ, вследствие всего вышеуказанного, сдвинут по отношению к рабочему току J лишь на небольшой угол α *).

Раньше считали, что ток i в катушке напряжения должен быть сдвинут по отношению к рабочему току J на 90°. Для осуществления этого сдвига был предложен ряд искусственных схем включения[9]) и лишь позже было установлено, что нужно добиваться только условия $\Phi_E \perp \Phi_J$. Этого раньше достигали, надевая короткозамкнутую катушку на магнитопровод катушки напряжения. В диаграмме нашей цепи ток $i_{m\epsilon}$ значительно сдвинут по отношению к i, вследствие сильного тока i_2, индуктируемого потоком Φ_E в диске. Этот поток находится в фазе с током $i_{m\epsilon}$. Небольшое влияние на сдвиг тока $i_{m\epsilon}$ имеет еще ток i_{hE}, идущий на покрытие потерь в железе по пути потока Φ_E. Этот ток в фазе с напряжением на клеммах E_k. Вторичный ток i_2, вследствие небольшой индукции диска, немного отстает по фазе от вторичного напряжения E_E. Как видим из нашей диаграммы, благодаря магнитному шунту, при соответственном выборе размеров магнитопроводов и катушек, легко достигнуть сдвига потока Φ_E по отношению к напряжению E_k на $\angle \beta = 90° + \angle \alpha$ и, тем самым выполнить условие $\Phi_E \perp \Phi_J$, не прибегая к искусственным схемам включения, короткозамкнутым катушкам, дросселям и т. п.

Фиг. 123.

Для регулирования Φ_E в готовом счетчике пользуются медной пластинкой (—A на фиг. 120), которую вводят в воздушный зазор магнитного шунта. Кроме того, на магнитную цепь катушки тока надевают виток, замкнутый на небольшое уаттное сопротивление; ток в этом сопротивлении, увеличивая $\angle \alpha$, дает возможность точно отрегулировать 90-градусный сдвиг.

Для создания вспомогательного вращающего момента, компенсирующего момент трения, в индукционных счетчиках применяют три рода приспособлений:

1) Помещают медную пластину (или кольцо) в воздушный зазор магнитопровода катушки напряжения над диском якоря; эта пластина прикрывает часть полюсной поверхности магнитопровода и, действуя как экран, создает небольшой вспомогательный вращающий момент.

---

*) На фиг. 123 ошибочно i_{hN} и i_{hE} не в фазе с E_k и Φ сокращено по величине.

2) В воздушном зазоре магнитопровода катушки напряжения делают небольшой выступ; часть потока Φ_E, проходящая через этот выступ, отстает по фазе от остального потока. Сдвиг потоков по фазе создает небольшой вращающий момент.

3) На одной стороне магнитопровода катушки напряжения помещают железный штифт, токи в диске намагничивают его, поток в нем, взаимодействуя с Φ_E, создает вспомогательный вращающий момент.

Ошибки в показания индукционного счетчика вносят: трение, непостоянство тормозящего момента и некоторая непропорциональность Φ_J и J, вследствие влияния магнитного насыщения.

Трение в индукционном счетчике равно около $^1/_3$ трения в электродинамическом счетчике, благодаря отсутствию коллектора и щеток и благодаря легкому якорю.

Тормозящий момент $M_{торм}$ складывается из тормозящего момента, создаваемого постоянным магнитом, из тормозящего момента, создаваемого потоком Φ_E и из тормозящего момента, создаваемого потоком Φ_J; при конструировании счетчика стремятся к тому, чтобы последний из них был относительно незначителен а чтобы тормозящий момент, создаваемый постоянным магнитом, был возможно больше.

В последнее время на электрических станциях переменного тока обращено больше внимание на улучшение коэффициента мощности — $\cos\varphi$. В осветительных установках напряжение у потребителя должно быть постоянно, нагрузка безиндукционна, поэтому счетчик амперчасов будет вполне достаточен для расчетов с потребителем. При всей своей дешевизне и простоте счетчик уаттчасов имеет один недостаток — его катушки напряжения непрерывно потребляют ток, главным образом безуаттный; при большом числе мелких потребителей в дневные часы этот небольшой ток может серьезно влиять на $\cos\varphi$ станции. Вот эта причина и вызвала к жизни индукционный счетчик амперчасов переменного тока. Такой счетчик, вращающий момент которого пропорционален квадрату силы тока, схематически показан на фиг. 124. Рабочий ток протекает через катушку с сопротивлением R и возбуждает два потока Φ_1 и Φ_2, пронизывающие подвижный диск. Один из потоков Φ_2 сдвинут по фазе по отношению к другому — Φ_1 на некоторый угол ψ. Достигнуто это посредством короткозамкнутой катушки b, надетой на магнитопровод потока Φ_2. Так как потоки сдвинуты по отношению друг к другу в пространстве и во времени, то, согласно теории индукционных приборов, на диск счетчика будет действовать вращающий момент

Фиг. 124.

$$M_{вр.} = K \cdot \nu \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \sin\psi,$$

где K — постоянная и ν — частота переменного тока.

Основное требование, пред'являемое нашему счетчику амперчасов следующее: так как вращающий момент растет пропорционально квадрату силы тока $M_{вр.} = K_1 \cdot J^2$, то и тормозящий момент должен расти

пропорционально квадрату числа оборотов за единицу времени: $M_{\text{торм.}} = K_2 \cdot n^2$.

Если эти требование исполнено, то

$$K_2 \cdot n^2 = K_1 \cdot J^2 \quad \text{и}$$

$$n = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \cdot J \, ,$$

$$A = \int_{t_1}^{t_2} n \cdot dt = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \cdot \int_{t_1}^{t_2} J \cdot dt \, .$$

Поток $\Phi_1 = K_3 \cdot J \mu_1 = K_4 \cdot J$

и $\Phi_2 = K_5 \cdot J \mu_2 = K_6 \cdot J \quad ;$

$$M_{\text{вр}} . = K \cdot \nu . \; \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \sin\psi = K_7 \cdot \nu . \; J^2 . \sin\psi .$$

В нормальных условиях работы счетчика ν и $< \psi$ остаются почти постоянными.

Исследование тормазов, удовлетворяющих названному условию, завело бы нас слишком далеко,—заметим лишь, что этому условию удовлетворит, например, тормаз, основанный на трении о воздух или о жидкость. Отсутствие хорошего тормаза, удовлетворяющего этому условию—главная причина малого распространения индукционных счетчиков амперчасов.

В других конструкциях индукционных счетчиков амперчасов, для получения двух полей, сдвинутых в пространстве и во времени, ставят взаимно перпендикулярно две катушки,—одну из них замыкают накоротко и обе они действуют на короткозамкнутый ротор.

Джон Буш [10]) (John Busch) предложил индукционный счетчик с линейным вращающим моментом. Для этого он дал железу магнитопроводов высокое насыщение, соответствующее работе близ перегиба кривой намагничивания. Известно, что при таком режиме, индукция растет пропорционально $\sqrt{J}$, благодаря чему

$$\Phi_1 . \Phi_2 = K . \sqrt{J} . \sqrt{J} = K . J$$

2) Маятниковые счетчики [11]).

Эта система счетчиков была предложена Ароном (H. Aron). Схема счетчика старого типа показана на фиг. 125. G_1 и G_2 два маятника, приводимые в движение часовым механизмом, маятник G_2 снабжен на конце тонкой катушкой S_h, r—добавочное сопротивление в цепи этой катушки, H—неподвижная катушка из толстой проволоки, помещенная прямо против конца маятника G_2.

Если цепь не нагружена (в катушке H нет тока), то качания обоих маятников должны быть вполне синхронны, для регулирования этих качаний маятник G_1 снабжен передвижным грузиком B. При

нагрузке в цепи катушки S_h и H будут взаимно притягиваться и ускорять качания правого маятника. Разность качаний маятников регистрируется дифференциальным счетным механизмом.

Работа прибора основана на следующем принципе:

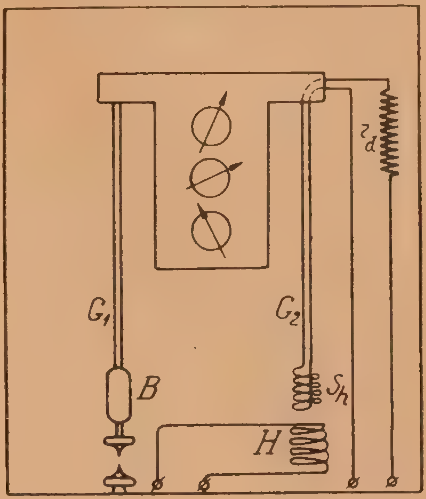
Известно, что время качания маятника выражается формулой

$$t_k = \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}},$$

где l — длина маятника и g — ускорение силы тяжести.

При нагрузке счетчика время качания маятника G_2 будет

$$t_k = \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g+g_1}}$$



Фиг. 125.

Рассмотрим случай нагрузки постоянным током. Электродинамическое взаимодействие двух катушек с током пропорционально произведению сил токов в них; в нашем же случае сила тока в катушке S_h пропорциональна напряжению в цепи, следовательно g_1 пропорционально произведению $E \cdot J.$, т.-е. мощности P. Поэтому мы можем написать

$$g_1 = K \cdot P.$$

Обозначим через n — число качаний в секунду при холостом ходе и через n_1 — число качаний при определенной нагрузке счетчика,

$$n = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{l}}$$

$$n_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{g+g_1}{l}} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{l}} \cdot \left(1 + \frac{g_1}{g}\right)^{1/2} =$$

$$= n \cdot \left(1 + \frac{g_1}{2g} - \frac{g_1^2}{8g^2} + \cdots\right) \cdot$$

Так как g_1 мало по сравнению с g, то, допуская некоторую неточность, мы можем пренебречь членами высшего порядка; тогда получим

$$n_1 - n = n \cdot \frac{g_1}{2g} = \frac{n}{2g} \cdot K \cdot P.$$

или

$$P = K_0 \cdot (n_1 - n) \quad ,$$

здесь K_0 обозначает постоянную величину $\frac{2g}{n \cdot K}$

Отсюда следует, что мощность пропорциональна разности качаний в секунду, и, следовательно, работа за определенное время пропорциональна всей разности качаний за это время.

Величина K_0, определенная таким образом, вполне точна только для очень малой нагрузки, по мере же увеличения нагрузки будет увеличиваться влияние члена $\frac{g_1^2}{8g}$, которым мы пренебрегали в нашем выводе, и постоянная прибора будет изменяться.

Счетчики старого типа нужно было периодически заводить и после каждой переноски с места на место вновь выверять.

Эти недостатки устранены в новом типе прибора. В нем оба маятника снабжены катушками; таким образом, в приборе имеются две катушки тока и две—напряжения; катушки эти включены так, что одна пара ускоряет качания одного маятника, другая же замедляет качания второго маятника. Каждые 20 минут автоматический переключатель изменяет направление тока в катушках на обратное (благодаря чему меняются роли маятников). Кроме того, прибор снабжен электрическим заводом.

Как видно из самого описания, прибор относительно сложен и вследствие этого дорог.

3) Электрохимические счетчики.

Счетчики этого типа (напр., кулонометр Эдиссона) — старейшие среди других систем. Построены они в виде вольтаметров, включенных в шунт цепи тока, т.-е. они измеряют амперчасы постоянного тока. Хотя они очень просты и дешевы, но не точны и обращение с ними хлопотливо, почему в настоящее время их применяют в относительно редких случаях. Самый распространенный из них — ртутный вольтаметр [12]). В нем катодом служит ртуть или платина, электролитом—соли ртути и анодом—ртуть. Количество протекшего тока определяется по количеству ртути, отложившейся в градуированной трубке.

---

1). Königswerther „Elekt. Zähler“ 1916; Brückmann „Elektr. Zähler“; Möllinger „Wirkungsweise der Motorzähler und Metßwandler“; Schmiedel „Wirkungsweise und Entwurf der Motor El. Zähler.

2) Доливо-Добровольский, E.T.Z. 113 (1913).

3) E.T.Z. 25 (1906).

4) E.T.Z. 997 (1914)

5) E.T.Z. 608 (1908)

6) E.T.Z. 684 (1911)

7) E.T.Z., 178, (1923).

8) Krukowski. „Vorgänge in der Scheibe eines Jnduktionszählers.

9) E.T.Z. 729 (1922); 169 (1923).

10) E.T.Z. 877 (1913).

11) H. Aron, E.T.Z. 372 (1897).

12) A. Kreider, Phys. Z. 582 (1905).

33.* Фазометры.

Безуаттную составляющую силы тока — $J \cdot \sin\varphi$ можно определить из показаний амперметра, вольтметра и уаттметра:

$$\cos\varphi = \frac{P}{E \cdot J},$$

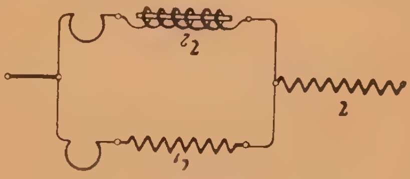
$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}.$$

При таком подсчете $\sin\varphi$ будет определен лишь приближенно, особенно при малом угле φ. Например, если при определении $\cos\varphi$ сделана ошибка на 1% (относительно хороший отсчет, так как для определения $\cos\varphi$ мы пользуемся показаниями трех технических приборов, с точностью каждого из них не выше 1%) а именно вместо истинного $\cos\varphi = 0{,}99$ определено $\cos\varphi = 1$,— то для $\sin\varphi$ это дает ошибку на 14%. Поэтому, чтобы следить за режимом сети, применяют ф а з о м е т р ы,— приборы, показывающие непосредственно угол φ в градусах или $\cos\varphi$, или, наконец, безуаттный ток $J \cdot \sin\varphi$.

Основные системы фазометров: электродинамические и индукционные.

1) Электродинамические фазометры.

Приборы этой системы состоят из толстой, неподвижной катушки и двух тонких, подвижных, укрепленных внутри неподвижной катушки на общей оси, под углом 90° друг к другу. Толстую катушку включают в цепь последовательно, две тонкие параллельно, по схеме фиг. 126. В цепь одной тонкой катушки включают чисто уаттное сопротивление r_1, в цепь другой сильно индукционное; с помощью одной из специальных схем включения (например, схемы Г у м м е л я [1]) добиваются того, что ток во второй подвижной катушке сдвинут по фазе по отношению к току в первой катушке ровно на 90°. Тогда вращающий момент, действующий на первую катушку будет



Фиг. 126.

$$H \cdot H_1 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\alpha,$$

на вторую

$$H \cdot H_2 \cdot \sin\varphi \cdot \cos\alpha,$$

где H — поле неподвижной катушки, H_1 и H_2 поля подвижных катушек, φ — угол сдвига фаз между током в неподвижной катушке и напряжением в цепи и α — угол между направлениями полей толстой и тонких катушек (см. фиг. 127), Если в этой системе катушек действуют только электродинамические силы, то при равновесии

Фиг. 127

$$H \cdot H_1 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\alpha = H \cdot H_2 \cdot \sin\varphi \cdot \cos\alpha,$$

откуда

$$tg\,\varphi = \frac{H_1}{H_2} \cdot tg\,\alpha = c \cdot tg\,\alpha,$$

т.-е. отклонение стрелки прибора, при постоянстве отношения $\frac{H_1}{H_2}$.

зависит только от $\angle \varphi$ в цепи и следовательно прибор можно градуировать непосредственно в градусах. В силу самого принципа устройства в приборе не должно быть никаких пружинок, создающих противодействующий момент.

Фазометру этой системы присущи все недостатки приборов электродинамической системы и, кроме того, его показания верны только

при определенной частоте, так как $\frac{H_1}{H_2} = \frac{r_1}{2\pi \cdot \nu \cdot L}$ изменяется с изменением ν; далее, благодаря малой величине действующих в приборе сил, показания его очень неточны.

Бругером Tuma, Мартинсеном (Martiensen) и друг., был предложен ряд различных конструкций электродинамических фазометров в которых путем различных приспособлений, ослабляется влияние этих недостатков, но все же типа электродинамического фазометра, точного и удобного в промышленной практике, до сего времени не выработано, почему на электрических станциях относительно редко устанавливают фазометры этой системы, а предпочитают определять $\cos \varphi$ вычислением по показаниям амперметра, вольтметра и уаттметра, или употребляют индукционные фазометры.

2) Индукционные фазометры.

Фазометры этой системы, собственно, измеряют не сдвиг фаз, а безуаттный ток $J \cdot \sin \varphi$. Принцип устройства их тот же, что и уаттметра с вращающимся магнитным полем, только момент вращения пропорционален $E \cdot J \cdot \sin \varphi$; при постоянном E прибор будет показывать $J \cdot \sin \varphi$. Существует ряд различных конструкций индукционных фазометров, например, Доливо-Добровольского, Ферранти и др. Всем этим приборам присущи недостатки приборов индукционной системы и, кроме того, они точны только при одном определенном напряжении.

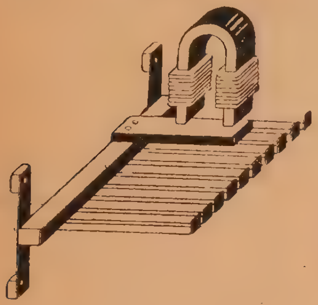
34.* Частотомеры.

В современной технике применяются частотомеры, основанные на принципе механического резонанса (Фрам, Кемпф, Гартман), электродинамические, электромагнитные и частотомеры с искусственными схемами.

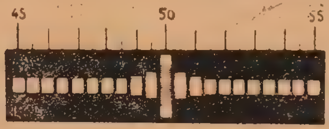
1) Резонансные частотомеры [1].

Прибор этой системы состоит из электромагнита A (фиг. 128), через катушку которого протекает исследуемый переменный ток; перед этим электромагнитом помещены два ряда стальных язычков B, один ряд с одной стороны, другой, с другой. Под воздействием электромагнита язычки приходят в колебание, но большой размах получают только колебания того язычка, собственный период колебания которого совпадает с периодом колебаний, сообщаемым электромагнитом или является целым числом, кратным этого числа периодов. В приборе ряд язычков подобран так, что периоды колебаний двух соседних язычков

разнятся на $^1/_4$ или на $^1/_2$ периода,— таким образом получается шкала для частоты. Чтобы сделать эти колебания более заметными, концы язычково тгибают и окрашивают белой краской (фиг. 129). В приборах Фрама электромагнит действует не на самые язычки, а на пластину, в которой данные язычки закреплены, и эта пластина уже механически передает колебания язычкам (по этому же принципу построен вибрационный тахометр Фрама). Прибор включается в цепь параллельно, как вольтметр, потребление энергии в нем около 1 уатта, точность измерения—около 0,2%. Язычки приборов при изготовлении подвергаются искусственному состариванию — механической нагрузке, значительно большей, чем та, при которой они будут работать. Единственный недостаток этих приборов, — относительная дороговизна.



Фиг. 128.



Фиг. 129.

2) Индукционные частотомеры.

Прибор этой системы состоит из двух электромагнитов, в воздушном зазоре которых вращается алюминиевый диск неправильной формы или насаженный на ось эксцентрически.

Электромагниты снабжены экранами. В цепь катушки одного электромагнита включено безиндукционное сопротивление, в цепь катушки второго электромагнита — сильно индукционное сопротивление. Диск тщательно уравновешен и никаких пружин не имеет. Согласно принципа приборов с экранами электромагниты стремятся вращать диск в разные стороны. Пусть, при определенной частоте, диск занял некоторое положение равновесия — вращающие моменты электромагнитов взаимно уравновешиваются; при изменении частоты в цепи, напр., при увеличении, уменьшится вращающий момент, создаваемый катушкой с индукционной цепью, диск несколько повернется, но, в силу его эксцентричности, при этом повороте увеличится момент вращения, создаваемый электромагнитом с индукционной цепью, и уменьшится момент вращения, создаваемый другим электромагнитом, и вновь наступит равновесие системы.

Таким образом, положение диска зависит от частоты переменного тока, чем и можно воспользоваться для построения шкалы частоты. Точность показаний этого прибора не велика.

3) Электромагнитные частотомеры.

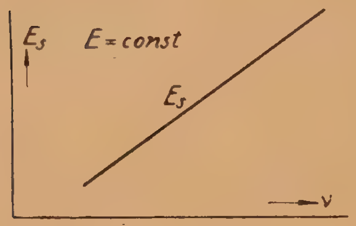
Стрелка прибора соединена с двумя железными пластинками, против каждой пластины помещено по соленоиду — катушке. Цепь одной из этих катушек почти безиндукционна, другой — сильно индукционна, При изменении частоты, так же, как в индукционных частотомерах, вращающий момент одной катушки остается неизменным, другой же изменяется и подвижная система принимает новое положение равновесия. Показания прибора зависят от напряжения в цепи.

В электромагнитном частотомере фирмы Weston катушки включены в ветви мостика Уитстона, составленного из самоиндукций и сопротивлений. Показания прибора этой конструкции мало зависят от напряжения, зато прибор сложен и громоздок.

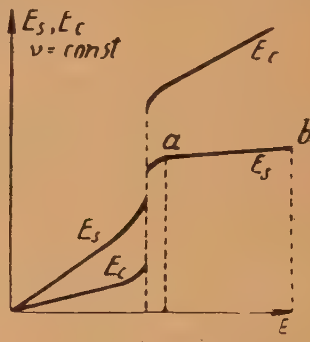
4) Частотомеры с искусственными схемами.

Рассмотрим два из таких частотомеров.

Прибор системы Мартинсена[2]) основан на исследованиях Мартинсена о характере резонанса напряжений в цепи из емкости и дроссельной катушки с насыщеным замкнутым железным сердечником



Фиг. 130

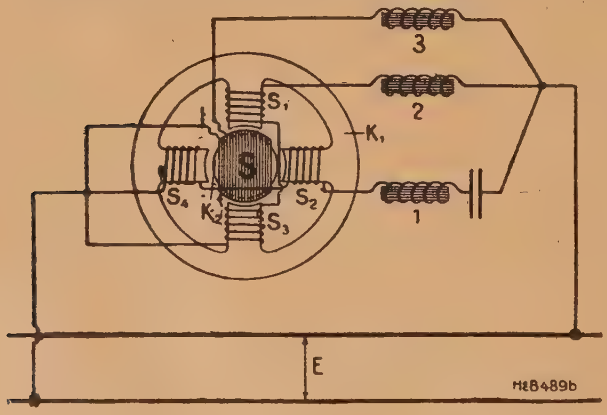


Фиг. 131

(явление „опрокидывания напряжения"). Кривые (фиг. 130 и 131) показывают ход явления.

Здесь — E напряжение на зажимах цепи, E_s — напряжение на зажимах дроссельной катушки, E_c — напряжение на обкладках конденсатора, ν — частота в цепи.

Мы видим из этих кривых, что если выбрать для катушки режим, соответствующий пределам a и b фиг. 131, то напряжение E_s будет зависеть только от частоты в цепи. Вольтметр любой системы, включенный на зажимы этой катушки, можно проградуировать в периодах. Мартинсен по этому принципу построил регистрирующий частотомер.



Фиг. 132

На фиг. 132 схематически показано устройство электродинамического частотомера фирмы Hartmann & Braun. Четыре катушки S_1, S_2, S_3, S_4, насаженые на железные сердечники, создают два поля сдвинутые в пространстве на 90°. В середине, охватывая неподвижный железный сердечник K_2, вращается катушка S. Одна пара катушек (S_1, S_3) включена в сильно индуктивную цепь (2), а другая пара (S_2, S_4) в цепь (1) ,содержащую емкость и самоиндукцию. Подвижная катушка включена в индуктивную цепь (3). Ток в нее подводится

через две бронзовые ленточки, не создающие крутящего момента. Все три цепи включены параллельно под исследуемое напряжение E.

Так как нет никакой механической направляющей силы, то подвижная катушка принимает некоторое положение равновесия под действием двух электрических моментов, направленных в противоположные стороны.

Положение подвижной катушки и связанной с ней стрелки зависит от отношений токов и фазовых сдвигов в трех цепях. Так как в одну из цепей включены последовательно емкость и самоиндукция, то соответственно подобрав их, можно добиться острой зависимости силы тока в этой ветви от частоты и, тем самым, большой чувствительности всего прибора. Изменения напряжения до ± 30% не влияют чувствительно на показания частотомера.

[1]) E.T.Z. (22) 9 (1901).
[2]) E.T.Z. (31) 204 (1910).
[3]) E.T.Z. (14) 303 (1924).

35. Баллистический гальванометр.

* Чтобы измерить быстро протекающее количество электричества, например, при разряде конденсатора или при магнитных измерениях, нужен прибор, отклонение подвижной системы которого было бы пропорционально протекшему количеству электричества; таким прибором и является баллистический гальванометр.

Общее уравнение вращательного движения, приобретаемого подвижной системой гальванометра с подвижной катушкой вследствие толчка, сообщенного мгновенно протекшим током, будет

$$K \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \Sigma \cdot M ,$$

где α — угол отклонения, K — момент инерции системы, $\Sigma \cdot M$ — сумма моментов действующих сил.

Действующие силы будут иметь следующие моменты:

1) Момент отклоняющей силы

$$M_1 = F \cdot \frac{d}{2} = (\text{сила} \times \text{плечо}),$$

$$F = 0{,}1 \cdot H \cdot i \cdot h \cdot 2n,$$

где n — число витков катушки гальванометра, h и d ее длина и ширина и H — напряжение магнитного поля. Обозначив площадь катушки через $S = h \cdot d$ и подставив значение F, получим

$$M_1 = 0{,}1 \cdot H \cdot i \cdot S \cdot n .$$

2) Момент противодействующей пары кручения подвеса („направляющей“ силы):

$$M_2 = - \cdot B \cdot \alpha ,$$

где B — коэффициент пропорциональности.

3) Момент пары трения подвижной системы о воздух, который мы приближенно примем пропорциональным скорости

$$M_3 = -f \cdot \frac{d\alpha}{dt} ,$$

где f — коэффициент трения.

4) Момент, создаваемый токами, индуктируемыми в катушке гальванометра при ее движении в поле H:

$$M_4 = -0{,}1 \cdot H \cdot i' \cdot S \cdot n\,,$$

$$i' = \frac{e'}{R}\,,$$

где R — сопротивление цепи катушки. Индуктируемая в катушке эл. дв. сила

$$e' = 2 \cdot H \cdot h \cdot \frac{d}{2} \cdot n \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cdot 10^{-8} = H \cdot S \cdot n \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cdot 10^{-8}\,,$$

откуда индуктированная сила тока

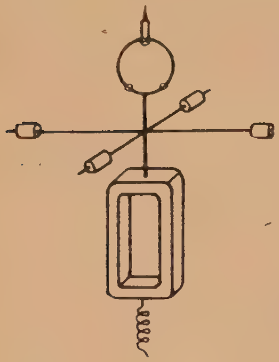
$$i' = \frac{H \cdot S \cdot n}{R} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cdot 10^{-8}\,;$$

подставив это значение, получим

$$M_4 = -\frac{H^2 \cdot S^2 \cdot n^2}{R} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cdot 10^{-9}\,.$$

Разберем, когда и какие из этих моментов действуют на катушку гальванометра.

Момент инерции подвижной системы баллистического гальванометра должен быть настолько значителен, чтобы она осталась неподвижной за промежуток времени τ, в течении которого ток проходит через гальванометр. Для увеличения момента инерции подвижную систему снабжают особыми грузиками (фиг. 133). Следовательно, для баллистического гальванометра за весь промежуток времени τ, отклонение $\alpha = 0$ и скорость $\frac{d\alpha}{dt} = 0$, поэтому в течение этого первого периода будет действовать только первый момент M_1, и основное уравнение движения получает для этого периода вид:



Фиг. 133.

$$K \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_1$$

или

$$K \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = 0{,}1 \cdot H \cdot S \cdot n \cdot i;$$

интегрируя в пределах от 0 до τ, получаем

$$K \cdot \left| \frac{d\alpha}{dt} \right|_0^\tau = 0{,}1\, H \cdot S \cdot n \cdot \int_0^\tau i \cdot dt,$$

но $\int_0^\tau i \cdot dt = Q$ = количеству протекшего электричества,

$$K \cdot \left| \frac{d\alpha}{dt} \right|_0^\tau = 0{,}1 \cdot H \cdot S \cdot n \cdot Q.$$

По истечении времени τ подвижная система тронется с начальной угловой скоростью

$$\omega_0 = \frac{0{,}1\, H \cdot S \cdot n \cdot Q}{K}; \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (A)$$

С этого момента начнем отсчет времени снова. Так как теперь $i = 0$ и есть уже движение, то будут действовать три остальные момента:

$$K \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -M_2 - M_3 - M_4$$

или

$$K \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \left(f + \frac{H^2 \cdot S^2 \cdot n^2}{R} \cdot 10^{-9} \cdot\right) \frac{d\alpha}{dt} + B \cdot \alpha = 0;$$

обозначим

$$f + \frac{H^2 \cdot S^2 \cdot n^2}{R} \cdot 10^{-9} = A,$$

тогда

$$K \frac{d^2\alpha}{dt^2} + A \cdot \frac{d\alpha}{dt} + B \cdot \alpha = 0.$$

Интеграл этого уравнения $\alpha = C \cdot e^{mt}$; m определяется из так называемого характеристического уравнения:

$$m^2 + \frac{A}{K} \cdot m + \frac{B}{K} = 0, -$$

$$m = -\frac{A}{2K} \pm \sqrt{\frac{A^2}{4K^2} - \frac{B}{K}}.$$

Если $\frac{A^2}{4K^2} < \frac{B}{K}$, иначе $A^2 < 4 \cdot B \cdot K$, то корни получатся мнимые. Для этого случая обозначим

$$\frac{A}{2K} = b \text{ и } \frac{B}{K} - \frac{A^2}{4K^2} = a^2,$$

тогда $m = -b \pm aj$; подставив это значение в интеграл, получаем

$$\alpha = e^{-bt}\left(C_1 \cdot e^{a.t.j} + C_2 \cdot e^{-a.t.j}\right),$$

где C_1 и C_2 постоянные интегрирования; далее

$$e^{a.t.j} = \cos at + j \cdot \sin at,$$

$$e^{-a.t.j} = \cos at - j \cdot \sin at;$$

подставив эти значения, имеем

$$\alpha = e^{-bt}\left(C_1 \cdot \cos at + C_2 \cdot \sin at\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (B)$$

Чтобы определить C_1 и C_2, обратимся к начальным условиям, когда $t = 0$ и $\alpha = 0$; для этого момента из уравнения (B) имеем, что $C_1 = 0$. Подставляя это значение C_1 в уравн. (B) и дифференцируя, получаем

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-bt}\left(-b \cdot C_2 \cdot \sin at + a \cdot C_2 \cdot \cos at\right).$$

Для момента $t=0$ левая часть приобретает величину, даваемую уравн. (A); отсюда

$$C_2 = \frac{0{,}1 \cdot H \cdot S \cdot n \cdot Q}{K} \cdot \frac{1}{a}.$$

Подставив эти значения в интеграл, получаем

$$\alpha = e^{-b.t} \frac{0{,}1 \cdot H \cdot S \cdot n \cdot Q}{K \cdot a} \cdot \sin at \quad \ldots\ldots\ldots (C)$$

и

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-b.t} \cdot \frac{0{,}1 \cdot H \cdot S \cdot n \cdot Q}{K} \cdot \left(\cos at - \frac{b}{a} \cdot \sin\ at \right).$$

Подвижная система остановится и $\frac{d\alpha}{dt}$ будет опять равно нулю, когда

$$\cos at' - \frac{b}{a} \sin at' = 0,$$

то-есть, когда

$$tg\ at' = \frac{a}{b} \quad \text{и} \quad \sin\ at' = \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}},$$

отсюда время первого отклонения

$$t' = \frac{1}{a}\ arc\ tg\ \frac{a}{b};$$

подставив в уравнение для α значения t' и $\sin at'$, определим угол первого отклонения системы

$$\alpha_1 = \frac{0{,}1 \cdot H \cdot S \cdot n \cdot Q}{K \cdot a} \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}} \cdot e^{-\frac{b}{a}\ arc.tg \frac{a}{b}};$$

$$\alpha_1 = Const \times Q,$$

следовательно угол α_1 первого отклонения баллистического гальванометра пропорционален протекшему количеству электричества.

Еще раз угловая скорость $\frac{d\alpha}{dt} = 0$, когда

$$tg\ at'' = tg\ (\pi + at'),$$

отсюда

$$t'' = \frac{\pi}{a} + t'$$

и в общем виде $t_n = \frac{\pi}{a} + t_{n-1}$.

Движение получается изохронное, продолжительность каждого полуколебания $\frac{\pi}{a}$, полный период колебания

$$T = \frac{2\pi}{a} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{B}{K} - \frac{A^2}{4K^2}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (D)$$

Если затухания нет ($f=0$ и $R=\infty$), или оно исчезающе мало, то и $A=0$, и

$$T=T_0=2\pi\sqrt{\frac{K}{B}}.$$

Так как согласно формуле (C) величина α содержит в себе множитель e^{-bt}, то амплитуда колебаний или размахи будут становиться все меньше и меньше, поэтому колебания и называются затухающими. Каждый размах меньше предыдущего в $e^{b\cdot\frac{T}{2}}$ раз.

Рассмотрим теперь случай действительных корней, когда

$$\frac{A^2}{4K^2} > \frac{B}{K}.$$

Обозначим

$$\frac{A}{2K}=b\ ,\quad \frac{A^2}{4K^2}-\frac{B}{K}=a^2$$

тогда

$$m=-b\pm a\ ,$$

на основании чего

$$\alpha=e^{-bt}\cdot(C_1\cdot e^{at}+C_2\cdot e^{-at})\ .$$

Обращаясь опять к начальным условиям — $t=0$ и $\alpha=0$ находим:

$$C_1+C_2=0$$

и

$$C_1=-C_2=0\ ,$$

следовательно

$$\alpha=e^{-bt}\cdot C_1\cdot(e^{at}-e^{-at})\ .$$

При $t=0$ имеем

$$\left[\frac{d\alpha}{dt}\right]_0=\omega_0=\frac{0{,}1H\cdot S\cdot n\cdot Q}{K}\ ,$$

$$\frac{d\alpha}{dt}=-e^{-bt}\cdot C_1\cdot\left\{e^{at}\cdot(a-b)+e^{-at}\cdot(a+b)\right\}.$$

Подставив второе условие, получаем

$$C_1=\frac{\omega_0}{2a}$$

на основании чего

$$\alpha=e^{-bt}\cdot\frac{e^{at}-e^{-at}}{2}\cdot\frac{\omega_0}{a}=e^{-bt}\cdot\frac{0{,}1H\cdot S\cdot n\cdot Q}{K\cdot a}\cdot \sinh\ at\ .$$

В этом случае подвижная система, под действием толчка от прошедшего количества электричества, отклонится на некоторый угол и затем, без колебаний, начнет двигаться назад к нулевому положению (апериодическое отклонение), но вернется она в это положение, теоретически, лишь через бесконечно большой промежуток времени.

Наконец, в случае равных корней при $\frac{A^2}{4K^2}=\frac{B}{K}$, на основании вывода для случая действительных корней,

имеем:

$$a=\frac{A^2}{4K^2}-\frac{B}{K}=0\ ,$$

и

$$\alpha=e^{-bt}\cdot\frac{0{,}1H\cdot S\cdot n\cdot Q}{K}\cdot\frac{\sinh\ at}{a}\ .$$

Как видим, последняя дробь дает неопределенность $\frac{0}{0}$. Раскрываем ее, умножив и разделив дробь на t; тогда

$$lim \left[\frac{sinh\ at}{at}\right]_{a=o} = 1$$

и

$$a = e^{-bt} \cdot \frac{0{,}1\, H \cdot S \cdot n \cdot Q}{K} \cdot t\ .$$

По своему физическому смыслу случай равных корней является только предельным случаем апериодического отклонения. *.

Вообще, баллистический гальванометр должен иметь подвижную систему, простой период T колебания которой, т.-е время между двумя прохождениями через точки возврата, относительно велик ($T > 15$ секунд при недемпфированных, $T > 20$ секунд при демпфированных колебаниях). Этим гальванометром пользуются, как уже указывалось, главным образом, для измерения количества электричества, которое протекает через прибор в течение столь короткого времени, что подвижная система прибора начинает двигаться, вследствие полученного толчка, только тогда, когда всё количество электричества уже протекло. Время $T' = \frac{T}{\pi}$ — недемпфированного отклонения должно быть при этом > 5 секунд. Для **гальванометра с магнитной стрелкой**, угол длительного отклонения которого, в зависимости от силы тока, удовлетворяет условию $J = c \cdot tg\,\varphi$ (по крайней мере для $\varphi < 5°$), можно определить протекшее количество электричества, при недемпфированной системе, по формуле

$$Q = 2c \cdot \frac{T}{\pi} \cdot sin\frac{\varphi}{2} \text{ в единицах } cgs\ ,$$

где φ обозначает угол первого баллистического отклонения.

Для **гальванометра с подвижной катушкой**, у которого отклонения φ пропорциональны силе тока J, имеем:

$$Q = c \cdot \frac{T}{\pi} \cdot \varphi \text{ в. единицах } cgs.$$

Это уравнение пригодно при достаточно малых углах φ и для гальванометра с магнитной стрелкой.

Угол отклонения φ определяется по числу делений шкалы s, при расстоянии a между шкалой и гальванометром (измеренном в делениях шкалы), из уравнения $tg\,2\varphi = \frac{s}{a}$; а так как для малых углов можно принять $tg\ 2\varphi = 2\,tg\,\varphi \approx 2\varphi$, то $\varphi = \frac{s}{2a}$.

Кроме того, так как $J = c \cdot \varphi = \frac{c}{2a} \cdot s = c_1 \cdot s$, то, если J измерено в амперах, получим:

$$Q = c \cdot \frac{T}{\pi} \cdot \frac{S}{2a} = c_1 \cdot \frac{T}{\pi} \cdot S \text{ кулонов.}$$

Постоянную $c_1 = \frac{J}{s}$ называют „статической" и определяют ее как силу тока в амперах, которая вызывает длительное отклонение на одно деление шкалы.

Эти результаты получены в предположении, что колебания изохронны, т.-е. не демпфированы *). Однако, колебания демпфируются уже сопротивлением воздуха и действием электромагнитной индукции при магнитных измерениях и исследованиях индукции, особенно у гальванометров с подвижной катушкой. Дуги отклонения убывают поэтому в виде геометрического ряда, т.-е. $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_3}$ и так далее. Отношение k между двумя последующими колебаниями постоянно и называется отношением демпфирования (затухания). Таким образом

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = k = \frac{\alpha_2}{\alpha_3} \text{ или } \frac{\alpha_1}{\alpha_3} = k^2$$

и в общем случае

$$\frac{\alpha^m}{\alpha^n} = k^{n-m} \text{ или } k = \sqrt[n-m]{\frac{\alpha^m}{\alpha^n}}\,.$$

Логарифм k называют логарифмическим декрементом, и обозначают $\log k = \lambda$ и $\ln k = \Lambda = 2{,}3026 \cdot \lambda$. Для демпфированных колебаний количество электричества

$$Q_d = Q \cdot k^{\frac{1}{\pi} \cdot \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\Lambda}} = c_1 \cdot \frac{T}{\pi} \cdot \left[k^{\frac{1}{\pi} \cdot \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\Lambda}} \right] \cdot s$$

или

$$\mathbf{Q_d = c_b \cdot s}\,.$$

Величину в скобках называют коэффициентом демпфирования D. Если $D \leqq 2$, то можно принять, что коэффициент $D = 1 + 1{,}16 \log k$ и, таким образом,

$$\mathbf{Q_d = c_1 \cdot \frac{T}{\pi} \cdot s \cdot (1 + 1{,}16 \cdot \log k)}\,.$$

Если $k \leqq 1{,}1$, то $D = \sqrt{k}$ и отсюда

$$\mathbf{Q_d = c_1 \cdot \frac{T}{\pi} \cdot s \cdot \sqrt{k}}\,.$$

Для определения баллистической постоянной

$$c_b = c_1 \cdot \frac{T}{\pi} \cdot \left[k^{\frac{1}{\pi} \cdot \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\Lambda}} \right]$$

необходимо определить время колебания T в секундах при недемпфированной системе, а также коэффициент k, отнесенный к бесконечно малой дуге.

---

*) Здесь у Линкера очевидная ошибка: как уже было показано в первой половине настоящего § 35, — теория баллистического гальванометра, — колебания будут изохронны и при затухании, т.-е. при демпфировании.

Редактор.

Для этой цели сначала определяют **время колебания** T_d при демпфировании, для чего определяют время t, в течение которого произойдет n колебаний, тогда

$$T_d = \frac{t}{n} \text{ секунд} .$$

Для медленных колебаний, при отсчете времени, удобно отмечать моменты, когда подвижная система проходит через положение покоя.

Покажем на примере, как можно **точно** определить T_d на основании наблюдений времени прохождения системы через положение покоя:

Прохождение.	Время.	Интервал.
1	0,0″	
2	8,0″	8 секунд
3	14,6″	6,6
4	22,4″	7,8
5	29,2″	6,8
6	37,0″	7,8
7	43,8″	6,8
8	51,7″	7,9
		51,7 сек.

Итак имеем:

$$t = 51{,}7 \text{ сек. } n = 7$$

или

$$\text{I. } T_d = \frac{51{,}7}{7} = 7{,}38 \text{ секунд.}$$

Трудно устранить при этом ошибки в отсчетах t.

Другой путь: делят четное число наблюдений на две группы и определяют разность значений, стоящих на одинаковом месте в каждой группе, например, в нашем случае:

$$\left.\begin{array}{l} 5-1 = 29{,}2 \text{ сек.} \\ 6-2 = 29{,}0 \text{ „} \\ 7-3 = 29{,}2 \text{ „} \\ 8-4 = 29{,}3 \text{ „} \end{array}\right\} \text{Средн. значение: } t = \frac{116{,}7}{4} = 29{,}175 \text{ сек.}$$

Сумма = 116,7 сек.

Это время t между 1 и 5 прохождениями заключает в себе $n = 4$ колебаний, так что точное значение

$$\text{II. } T_d = \frac{29{,}175}{4} = 7{,}26 \text{ сек.}$$

Если вместо разности возьмем среднее значение между двумя наблюдениями, лежащими симметрично по отношению к середине, то получим время между двумя точками возврата, так что в рассматриваемом случае

$$4 \div 5)\ \frac{22{,}4 + 29{,}2}{2} = 25{,}8 \qquad 3 \div 6)\ \frac{14{,}6 + 37}{2} = 25{,}8$$

$$2 \div 7)\ \frac{8 + 43{,}8}{2} = 25{,}9 \qquad 1 \div 8)\ \frac{0 + 51{,}7}{2} = 25{,}85 .$$

Среднее значение будет 25,84 сек.

Теперь дадим гальванометру свободно колебаться, при чем не будем производить отсчетов. Затем начнем новую серию наблюдений с отклонения в ту же сторону, как при первом измерении; вновь отметим серию из восьми колебаний, при чем получим для новой точки возврата среднее время 113 сек. Итак, между обоими точками (моментами) возврата прошло время $t = 113 - 25{,}84 = 87{,}16$ сек. При длительности колебания около 7,3 сек. между этими моментами должно произойти цельное число $n = \frac{87{,}16}{7{,}3} \simeq 12$ колебаний, из чего следует

$$\text{III.} \quad T_d = \frac{t}{n} = \frac{87{,}16}{12} = 7{,}263 \text{ сек.}$$

Отсюда можем определить T для недемпфированных колебаний по формуле

$$T = \frac{T_d}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Lambda}{\pi}\right)^2}}.$$

Далее требуется привести измерения к очень малым дугам; для гальванометров с магнитной стрелкой (с направляющей силой земного магнетизма) нужно поэтому еще ввести поправку по формуле Гаусса

$$T_{d_0} = T_d \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{cp}{}^2}{256 \cdot a^2}\right),$$

где α_{cp} — среднее отклонение изо всех отсчитанных при определении T_d. У гальванометров с подвижной катушкой эта поправка не нужна, т. к. время колебания T_d системы, двигающейся благодаря кручению, не зависит от амплитуды колебаний.

Отношение демпфирования k определяют точно не по двум только отсчетам, а по четному числу наблюдений, следующим образом:

$$\left.\begin{array}{ll} \alpha_1 = 240 & \alpha_4 = 87{,}5 \\ \alpha_2 = 171 & \alpha_5 = 62{,}0 \\ \alpha_3 = 122 & \alpha_6 = 44{,}5 \end{array}\right\}$$

от делений шкалы α_s переходят к угловым единицам по формуле $\alpha = \alpha_s \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{\alpha_s{}^2}{a^2}\right)$.

Отсюда найдем

$$\left.\begin{array}{lr} \frac{\alpha_1}{\alpha_4} = k^3 = 2{,}74 & k = 1{,}400 \\ \frac{\alpha_2}{\alpha_5} = k^3 = 2{,}76 & 1{,}403 \\ \frac{\alpha_3}{\alpha_6} = k^3 = 2{,}74 & 1{,}400 \end{array}\right\} \text{ в среднем: } k = 1{,}401.$$

Отношение демпфирования для гальванометра с соленоидом зависит от сопротивления цепи гальванометра и помещенных в нее железных масс (торроид, ярмо); поэтому целесообразно определить отношение демпфирования k для различных сопротивлений цепи и построить кривую демпфирования $f(k, R)$, нанеся значения k как ординаты, а сопротивления цепи, замыкающей гальванометр, как абсциссы.

Подробную теорию баллистического гальванометра с подвижной катушкой дали Диссельхорст[1]) и Уорсинг (Worthing)[2]).

Методы определения c_b.

Согласно уравнению $c_b = \frac{Q}{s}$, c_b определяется как количество электричества, вызывающее отклонение на одно деление шкалы. Поэтому, чтобы определить c_b, достаточно получить (и измерить в делениях шкалы) баллистическое отклонение s с помощью известного количества электричества Q. Это делается:

а) Посредством индукционной катушки.

Очень длинная, по сравнению со своим диаметром d, катушка длиною l ($> 25d$) и сечением $F\ cm^2$ состоит из одного слоя w_1 витков. Вокруг ее середины плотно навита узкая вторичная катушка из w_2 витков, приключенная к баллистическому гальванометру. Если через первичную катушку протекает ток J_1 амп., то, при переключении на $-J_1$ амп., за время $0 \div t$ гальванометр покажет отклонение s.

Вследствие индукции в середине длинной катушки, определяемой по формуле

$$B_0 = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{J_1 \cdot w_1}{l} \text{ гауссов,}$$

через вторичную катушку пройдет поток силовых линий

$$\Phi = F \cdot B_0 = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{J_1 \cdot w_1 \cdot F}{l} \text{ максвеллов}.$$

При переключении тока в этой катушке появится электродвижущая сила

$$\text{I.} \quad E_t = -w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = -\frac{4\pi}{10} \cdot \frac{F \cdot w_1 \cdot w_2}{l} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{dJ_1}{dt} =$$

$$= -M \cdot \frac{dJ_1}{dt} \text{ вольт}.$$

Эта эл. дв. сила вызовет в сопротивлении R_2 ток J_2t, согласно уравнению

$$\text{II.} \quad E_t = J_{2t} \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt}.$$

Из I-го и II-го следует:

$$-M \cdot d\,J_1 = R_2 \cdot J_{2t} \cdot dt + L_2 \cdot dJ_2.$$

Для промежутка времени $0 \div t$ имеем

$$-M \cdot \int_{+J_1}^{-J_1} dJ_1 = R_2 \cdot \int_0^t J_{2t} \cdot dt + L_2 \cdot \int_0^0 dJ_2$$

или

$$M \cdot 2J_1 = R_2 \cdot Q,$$

из чего следует:

$$Q = \frac{2 \cdot M \cdot J_1}{R_2} = c_b \cdot s$$

или

$$c_b = \frac{2 \cdot M \cdot J_1}{R_2 \cdot s},$$

где $$M = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{F \cdot w_1 \cdot w_2}{l} \cdot 10^{-8} \text{ генри}$$

и может быть подсчитано по размерам катушек.

Из этого уравнения мы видим, что c_b зависит от R_2 и что для градуирования гальванометра можно воспользоваться любыми двумя катушками, коэффициент взаимоиндукции M (генри) которых известен и постоянен. Такого рода катушки предложили Сирль (Searle)[3]) и Кэмпбелл[4]).

b) Посредством конденсатора.

Конденсатор известной емкости без остаточного заряда (диэлектрик воздух или слюда) заряжают точно измеренным напряжением E и сейчас же разряжают через баллистический гальванометр, при чем получают первое отклонение s. Протекшее количество электричества будет

$$Q = C \cdot E = c_{b0} \cdot s\,,$$

или

$$c_{b0} = \frac{C \cdot E}{s}\,.$$

Этой постоянной можно пользоваться, если сопротивление гальванометра не превышает 100.000 Ω, при наименьшем демпфировании k_0, и при разомкнутой цепи гальванометра, следовательно, при измерениях индукции этой постоянной пользоваться нельзя.

Если прибор, при измерении, работает с коэффициентом демпфирования k, то для этого случая соответствующая постоянная будет

$$c_b = c_{b0} \cdot \frac{k}{k_0}\,.$$

c) С помощью постоянного магнитного поля.

Два магнитные стержня с одинаковым числом силовых линий Φ (максвелл) при одинаковом направлении осей, сближают одноименными полюсами так, что между ними остается только узкий промежуток. На стержни надета одна катушка из w_2 витков, которую можно передвигать от середины одного стержня к середине другого. При быстром движении катушки замкнутый на нее гальванометр дает отклонение s, при сопротивлении R_2 в цепи гальванометра. Тогда имеет место отношение:

$$E_t = -w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = J_{2t} \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt}\,,$$

или

$$\int_0^t E_t \cdot dt = -w_2 \cdot 10^{-8} \cdot \int_{+\Phi}^{-\Phi} d\Phi = R_2 \cdot \int_0^t J_2^t \cdot dt + L_2 \cdot \int_0^0 dJ_2\,,$$

из чего следует

$$w_2 \cdot 10^{-8} \cdot 2\Phi = R_2 \cdot Q = R_2 \cdot c_b \cdot s$$

или

$$c_b = \frac{2 \cdot w_2 \cdot \Phi}{R_2 \cdot s} \cdot 10^{-8}.$$

---

1) Ann. d. Ph. 458 (1902). 2) Phys. Rev. (6) 165. 3) El. 318 (1905).
4) Proc. Phys. Soc. London 69 (1908); Phil. Mag. 155 (1908); ZfJ. 222 (1908) (рефер).

36. Сравнение емкостей (баллистически).

С помощью эталонного конденсатора C_1 можно определить емкость другого конденсатора C_2, для чего обоим конденсаторам, одним и тем же напряжением E, сообщают заряды Q_1 и Q_2. Тогда

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1 \cdot E}{C_2 \cdot E} = \frac{C_1}{C_2}.$$

Если разрядить оба конденсатора через баллистический гальванометр, то отклонение α будет пропорционально количеству электричества, или $Q_1 = c \cdot \alpha_1$ и $Q_2 = c \cdot \alpha_2$. Из чего следует

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{c \cdot \alpha_1}{c \cdot \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

или

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}.$$

Перед опытом, однако, нужно точно установить границы пропорциональности, для чего включают эталонный конденсатор под различные напряжения, тогда при разрядах отклонения должны быть пропорциональны напряжениям. В противном случае нужно построить кривую $f(Q, \alpha)$.

Если исследуемый конденсатор обладает свойством диэлектрической абсорпции (остаточного заряда), то при долгом замыкании цепи разряда отклонение гальванометра может стать слишком большим (вследствие остаточного заряда). Чтобы устранить эти ошибки Зелени (Zeleny) [1]) сконструировал ключ, с помощью которого можно произвести разряд сейчас же за отключением источника тока и кроме того установить время, нужное для истинного разряда „свободного“ количества электричества. При этом выбирают продолжительность разряда, лежащую между двумя другими промежутками времени, для которых получаются такие же отклонения. Отдельные контакты могут быть установлены один за другим также с помощью маятника.

Если для измерения емкости и индукции был применен постоянный ток, то полученные результаты не вполне точны для переменного тока. Благодаря зарядной емкости и диэлектрической абсорпции, а также увеличению сопротивления проводников, вследствие неравномерного распределения плотности тока в сечении проводника и, наконец, благодаря магнитному гистерезису оказывается большая разница в величине емкости и индукции в зависимости от рода тока и частоты; поэтому следует, поскольку это доступно, испытывать аппараты, обладающие емкостью и индукцией, тем же видом тока и при той же частоте, при которых они должны обычно работать. Если измеряемые величины показывают незначительную зависимость от частоты или отсутствие этой зависимости, то, при сравнениях или при относительных измерениях нет нужды знать эту частоту. Только при абсолютных измерениях, необходимо дать аппарату определенную частоту и поддерживать её постоянной во всё время опыта. Число периодов можно измерять с помощью камертона с изменяемой высотой звука. Для этой цели камертон настраивают на звук, вызываемый переменным током. Изменение частоты последнего сейчас же вызовет появление биений. Приближенно частота может быть измерена с помощью резонансной трубы по Шмидту [2]), надетой на

телефон. Частота определяется по длине появляющихся внутри трубки пыльных фигур Кундта.

Если переменный ток получают от машины или посредством применения вращающегося прерывателя, то нужно только измерить число оборотов и поддерживать его постоянным. Роза[3]) предложил метод для точного измерения числа оборотов и поддержания этого числа постоянным.

Самодействующая установка для поддержания постоянного числа оборотов, основанная на принципе центробежного регулятора Гельмгольца[4]), сконструирована Гибе (Giebe)[5]) в *PTR*. Согласно произведенным с нею опытам можно поддерживать постоянным число оборотов до нескольких сотен тысяч. Тем же Гибе подробно разработана теория этого вопроса.

Для приводимых ниже измерений емкости и индукции, кроме указанных в § 21, применяют еще следующие

Источники тока:

Струнный прерыватель[6]) впервые применен для измерений М. Вином[7]), и с некоторыми изменениями, предложенными Орлихом[8]), введен в употребление в *PTR*. Он состоит из медной струны, помещенной в сильном магнитном поле; при прохождении тока струна подымается до тех пор, пока не разомкнутся два, находящиеся на ней, погруженные в ртуть, контакта и тем не будет прерван ток в первичной цепи индуктора. В противоположность обычным прерывателям с молоточком, в этой установке число периодов остается постоянным и, кроме того, может быть изменено почти до 500. Вследствие прерывания тока получается однако отнюдь не синусоидальный переменный ток.

Подобным же образом построен прибор Когэна (Cohen)[9]).

Для получения чисто синусоидальных токов удобен зуммерумформер[10]), сконструированный Долезалеком (фиг. 134) и изготовляемый фирмой Siemens & Halske.

Принцип его устройства следующий: под мембраной *M* помещен микрофон *B*, он вызывает изменения сопротивления, а тем самым и силы тока в первичной катушке *P*, которая, в свою очередь, вызывает во вторичной катушке *S*, включенной на нагрузку (пунктир), токи синусоидальной формы. Намотанная на стальной цилиндр *R* катушка *s* усиливает движения мембраны. Зуммер работает поэтому только при замкнутой вторичной цепи. Частота может быть изменена в зависимости от выбора толщины мембраны от 300 до 900.

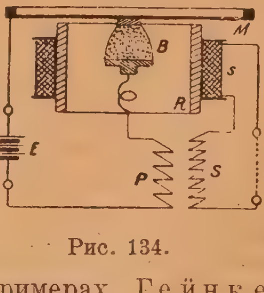


Рис. 134.

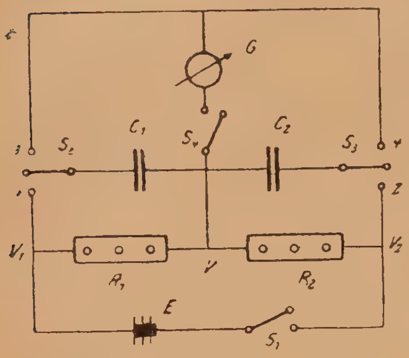
Для практических измерений сильных токов удобно применять, как источник переменного тока, вольтову дугу, как это показал на многих примерах Гейнке (Heinke)[11]).

---

[1]) Phys. Rev. 65 (1906); Orlich, Ind. u Kapazität, 203.
[2]) Ann. d. Ph. 225 (1902). [3]) Bull. Bur. Stand. 557 (1907).
[4]) Müller-Pouillet, Lehrb. d. Phys., 8 изд. (3) 505 (1881).
[5]) ZfJ 152, 205 (1909). [6]) Land und Seekabelwerke Köln-Nippes.
[7]) Wied. Ann. 598 (1891). [8]) ZfJ. 126 (1904), [9]) Phil. Mag. 408 (1908); ZfJ. 380 (1909).
[10]) Druckschrift (105); ZfJ. 242 (1903). [11]) ETZ. 913 (1907).

37. Сравнение емкостей посредством компенсации (В. Томсон).

Сравниваемые конденсаторы включаются вместе с батареей E, баллистическим гальванометром G, двумя безиндукционными сопротивлениями R_1 и R_2 и четырьмя ключами S согласно приводимой схеме (фиг. 135).



Фиг. 135.

Если ключи S_2 и S_3 (желательно конструкции Зелени [стр. 116]) замкнуты, то конденсаторы получают заряды

$$Q_1 = C_1 \cdot (V_1 - V)$$

и

$$Q_2 = C_2 \cdot (V - V_2) \, .$$

Если замкнуть S_4 и перевести на верхние контакты S_2 и S_3, то конденсаторы разрядятся. Если $Q_1 = Q_2$, то гальванометр не покажет отклонения и из этого следует:

$$C_1 \cdot (V_1 - V) = C_2 \cdot (V - V_2) \text{ или I. } \frac{C_1}{C_2} = \frac{V - V_2}{V_1 - V} \, .$$

При этом через оба сопротивления R_1 и R_2 протекает ток J, почему должно иметь место уравнение

$$[J =] \, \frac{V_1 - V}{R_1} = \frac{V - V_2}{R_2}$$

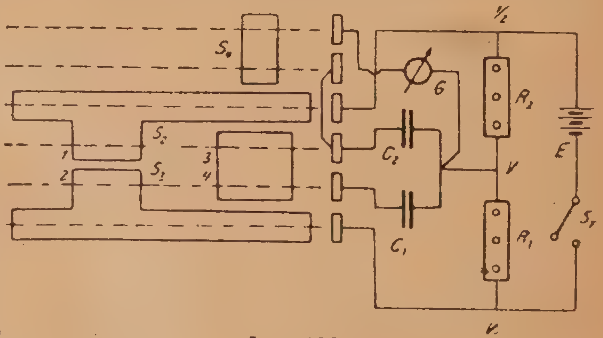
или

$$\text{II. } \frac{V - V_2}{V_1 - V} = \frac{R_2}{R_1} \, .$$

Из уравнений I и II получаем:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{R_2}{R_1} \, .$$

Данный метод измерения, по сравнению с методом де Соти (de Sauty), (§ 38) имеет то преимущество, что в этом случае можно выбрать любую длительность времени заряда и разряда, в то время как при работе по методу де Соти каждый конденсатор заряжается в течение одного и того же времени, что при конденсаторах с различными диэлектриками и потому различными по величине остаточными зарядами (электрической абсорпцией) легко может вызвать ошибки в результатах измерения.



Фиг. 136.

При измерении по методу В. Томсона целесообразно заменить три ключа S_2, S_3, S_4 самодействующим переключателем, известным под

названием ключа Гейма (Heim) [8]). Развернутая на плоскость упрощенная схема последнего, вместе со схемой нашего включения приборов, показана на фиг. 136.

В аппарате, выполненном по этой схеме, контактная полоска S_4 укреплена на цилиндре, поворачивающемся по отношению к контактам S_2 и S_3, так что, установив соответственно S_4, можно сравнивать без ошибки конденсаторы с различным временем разряда и остаточными зарядами. Правильное положение S_4 получим тогда, когда перед опытом, при медленном вращении переключателя, получим наименьшее отклонение гальванометра, по сравнению с его отклонениями при других положениях S_4.

[1]) E.T.Z. 556 (1890).

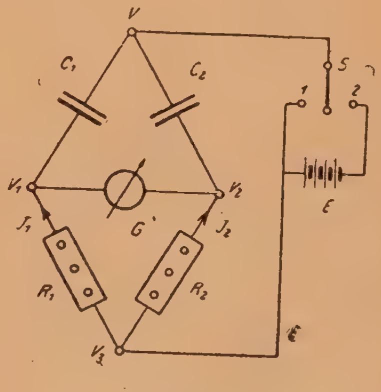
38. Сравнение емкостей (де Соти).

Эталонный конденсатор C_1 и сравниваемый C_2 соединяются вместе с безиндукционными сопротивлениями R_1 и R_2, согласно схеме фиг. 137, в мостик Уитстона. Ключ S переводится на контакт 2, тогда конденсаторы заряжаются. При переводе S на контакт 1 конденсаторы разряжаются. Если R_1 и R_2 подобраны так, что при заряде и разряде конденсаторов гальванометр G не дает отклонения, то потенциал $V_1 = V_2$. Тогда

$$V_1 - V = \frac{Q_1}{C_1} \text{ и } V_2 - V = \frac{Q_2}{C_2},$$

где Q обозначает количество электричества. Так как левые части обоих уравнений равны, то

$$\text{I.} \quad \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2}.$$



Фиг. 137.

С другой стороны, имеем токи J_1 и J_2, а из равенств $V_3 - V_1 = J_1 \cdot R_1$ и $V_3 - V_2 = J_2 \cdot R_2$ получаем $J_1 \cdot R_1 = J_2 \cdot R_2$, так как $V_1 = V_2$. Умножив это уравнение на dt и проинтегрировав для промежутка времени от 0 до t, найдем:

$$R_1 \cdot \int_0^t J_{1t} \cdot dt = R_2 \cdot \int_0^t J_{2t} \cdot dt,$$

где интегралы выражают количества электричества пошедшие на заряд конденсаторов; на основании чего можем написать

$$\text{II.} \quad R_1 \cdot Q_1 = R_2 \cdot Q_2.$$

Из уравнений I и II получаем отношения:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{C_2}{C_1}$$

или

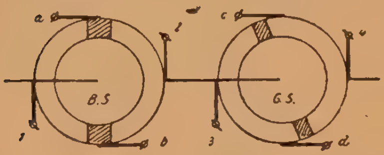
$$\mathbf{\frac{C_1}{C_2} = \frac{R_2}{R_1}}$$

Для уточнения этого измерения, вместо ключа S включают вращающийся двойной коммутатор или секометр по Эйртону (Ayrton) и Перри (Perry) [1]).

Этот аппарат состоит из двух коммутаторов BS и GS, для батареи и гальванометра, с общею осью, сдвинутых на малый угол по отношению друг к другу (фиг. 138). Первый коммутатор превращает постоянный ток в переменный, а второй опять выпрямляет ток, идущий в гальванометр, так что если в ветви гальванометра есть ток, то действия толчков тока будут складываться.

При этом элемент E приключают к клеммам коммутатора $a \div b$ и $V \div V_3$ к $1 \div 2$; V_1 и V_3 присоединяются к 3 и 4 и гальванометр включается к $c \div d$.

Лучше на место батареи E включить источник переменного тока и заменить G телефоном или вибрационным гальванометром. При конденсаторах с сильной диэлектрической абсорпцией часто бывает, нельзя добиться полного прекращения звука в телефоне или колебаний гальванометра. Подробные исследования об источниках ошибок при этом измерении произвели Гровер (Grover) [2]), Бэне (Behne) [3]), и Гибе (Giebe) [4]), а Роза [5]) дал метод для их устранения.



Фиг. 138.

В качестве эталонного конденсатора при этом измерении удобен конденсатор, построенный Шерингом и Шмидтом [6]). Для точного измерения малых емкостей фирма Telefunken-Gesellschaft построила, изменив немного вышеописанную схему, специальный мостик для переменного тока [7]).

Для определения емкости кабелей Хоу (Howe) [8]) произвел ряд опытов, пользуясь методом де Соти. Чтобы добиться замолкания телефона он включил в провод, между источником переменного тока и мостиком, первичную катушку вариометра взаимоиндукции, вторичную катушку которого включил на конденсатор. Посредством изменения взаимоиндукции можно достичь резонанса и благодаря этому получить ток приближенно синусоидальной формы.

Если конденсаторы, вследствие недостаточной изоляции (парафинированная бумага) обладают и диэлектрическими потерями и остаточными зарядами, то можно определить угол потерь и емкость конденсаторов с помощью измененного включения Роза или М. Вина; в этом включении устранено влияние названных источников ошибок, как это показал на многочисленных опытах Гровер [9]) (сравнить также § 54).

Если заменить в схеме фиг. 137, например, сопротивление R_2 кабелем и включить в ветви конденсаторов безиндукционные сопротивления, то получим включение, предложенное Хэй (Hay) [10]), которое позволяет измерить сопротивление при переменном токе и фазовый угол (постоянную затухания колебаний) кабелей.

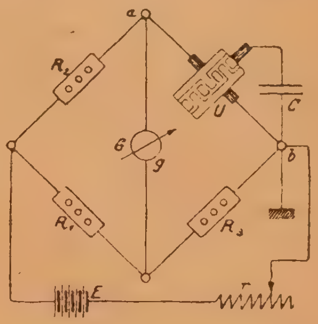
---

[1]) ETZ. 483 (1896). [2]) „Bull. Bur. Stand.“ 371 (1907).
[3]) El. и M. Wien. 871 (1909). [4]) ZFJ. (1) (1911).
[5]) Bull. Bur. Stand. 389 (1907). [6]) ETZ. 1343 (1912).
[7]) ETZ. 526 (1904). [8]) El. 27. 3 (1908); El. и M. Wien. 389 (1908).
[9]) Bull. Bur. Stand. 495 (1911); ETZ. 42 (1913).
[10]) El. 559 (1912); ETZ. 277 (1913).

39. Абсолютное измерение емкости.

(Максвелл — Дж. Дж. Томсон) [1]).

Это точнейший и надежнейший метод для определения емкостей конденсаторов с точностью до $^1/_{100}$ $^0/_{00}$. Измеряемый конденсатор C включают, согласно схеме фиг. 139, вместе с вращающимся переключателем U в четвертую ветвь мостика Уитстона, заключающего в себе кроме того безиндукционные сопротивления R_1, R_2, R_3. Вращающийся переключатель предложили Курльбаум (Kurlbaum) и Егер [2]), улучшил Гибе [3]). В качестве источника тока пользуются аккумулятором E ($16 \div 20$ вольт) с регулируемым сопротивлением r Постоянство числа прерываний поддерживают с помощью регулятора числа оборотов Гибе [4]). Точка b заземляется, чтобы сделать измерение независимым от емкости окружающих предметов.



Фиг. 139.

Если сопротивления отрегулированы так, что гальванометр G не дает отклонения, то, согласно Дж. Дж. Томсону [5]), имеем:

$$C = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{R_1}{R_2 \cdot R_3} \cdot F \ ,$$

где

$$F = \frac{1 - \dfrac{R_1^2}{(R_1 + R_3 + r) \cdot (R_1 + R_2 + g)}}{\left[1 + \dfrac{R_1 \cdot r}{R_2 \cdot (R_1 + R_3 + r)}\right] \cdot \left[1 + \dfrac{R_1 \cdot g}{R_3 \cdot (R_1 + R_2 + g)}\right]}$$

приближенно может быть принято равным единице, если только взять гальванометр с малым собственным сопротивлением ($g < 200\,\Omega$), R_1 малое по сравнению с $\dfrac{1}{\nu \cdot C}$ и $\dfrac{R_1}{R_2} = \dfrac{1}{10} \div \dfrac{1}{100}$; ν обозначает число зарядов и разрядов в секунду через прерыватель U. Формула выведена следующим образом:

При каждом заряде и разряде конденсатора перемещается количество электричества $Q = C \cdot E$. При этом между точками $a \div b$ при ν пер./сек. течет средний ток $J_{\text{сред.}} = \dfrac{Q}{T} = \nu \cdot C \cdot E$. Тот же ток получится если конденсатор заменить сопротивлением R_4 и ветвь между $a \div b$ (включая g и r) сопротивлением R. Тогда получим отношение:

$$J_{\text{сред.}} = \frac{E}{R_4 + R} = \nu \cdot C \cdot E.$$

или

$$\text{I.} \qquad R_4 = \frac{1}{\nu \cdot C} - R.$$

Как только гальванометр перестал давать отклонения, имеем:

$$\text{II.} \qquad R_4 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}.$$

Из I и II следует:

$$C = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{1}{\frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} + R} = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{R_1}{R_2 \cdot R_3} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{R \cdot R_1}{R_2 \cdot R_3}} \right),$$

где выражение в скобках и есть поправочный множитель, равный F.

Этот метод имеет то преимущество, что малые величины самоиндукции и емкости в сопротивлениях и проводах мостика не оказывают влияния на результат, если они не настолько велики, чтобы замедлять заряд конденсатора. Чтобы избежать ошибки от неполного заряда конденсатора, вращающийся контактный прибор U должен быть рассчитан так, чтобы время заряда t было не больше $T = \frac{1}{\nu}$ — продолжительности одного периода. Это отношение $\frac{t}{T}$ можно определить с помощью измерения, по Диссельхорсту [6]), который кроме того дал в общей форме доказательство метода.

В этом случае

$$C = \frac{\frac{1}{\nu} \cdot \frac{R_1}{R_2 \cdot R_3} \cdot F}{1 - e^{-\frac{t}{T} \cdot \frac{1}{1 - F}}}$$

В какой степени могут повлиять на результат измерения ошибки, вызываемые несовершенством изоляции конденсатора и прерывателя, температурой и давлением воздуха аналитически показал и пояснил примерами Гибе [7]).

---

1) ZFJ. 112 (1901); 35 (1906) Bull. Bur. Stand. 153 (1905).
2) ZFJ. 325 (1906).
3) ZFJ. 274 (1909).
4) ZFJ. 205 (1909).
5) Phil. Tr. Roy. Soc. London 707 (1883).
6) Ann. d. Ph. 382 (1906).
7) ZFJ. 269, 310 (1909).

40. Абсолютное измерение емкости посредством дифференциального гальванометра [1]).

Конденсатор C включают вместе с прерывателем U, упоминавшимся в § 39, по схеме фиг. 140 к одной катушке g_1 дифференциального гальванометра и к источнику постоянного тока E; катушку же g_2 питают непосредственно постоянным током через сопротивления R_1, R_2, R_3.

После того как гальванометр установлен, согласно условию I (измерение § 6), с помощью прерывателя U заряжают и разряжают конденсатор ν раз в секунду, а появившееся отклонение устраняют, изменяя сопротивлений $R_{1 \div 3}$.

Через g_1 тогда течет средний ток (сравн. § 39).

$$\text{I.} \qquad J_1 = \nu \cdot C \cdot E.$$

Для катушки g_2 имеют место отношения:

$$1.\qquad J_3 = J_2 \cdot \frac{R_2+g_2}{R_3}\ ;\qquad E-(J_2+J_3)\cdot R_1 = J_3\cdot R_3\,,$$

или

$$2.\qquad J_3 = \frac{E-J_2\cdot R_1}{R_1+R_3}$$

Приравнивая 1-ое и 2-ое получим:

$$\text{II.}\qquad J_2 = \frac{E\cdot R_3}{(R_1+R_3)\,(R_2+g_2)+R_1\cdot R_3}$$

Так как по условию I ток $J_1 = J_2$, то из I и II следует:

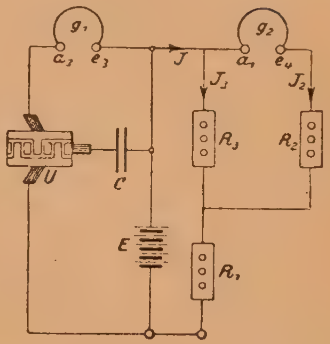
$$C = \frac{1}{v}\cdot\frac{R_3}{(R_1+R_3)\cdot(R_2+g_2)+R_1\cdot R_3}$$

или

$$C = \frac{1}{v}\cdot\frac{R_3}{R_1\cdot R_2\cdot(1+K)}\,,$$

где

$$K = \frac{g_2}{R_2}+R_3\cdot\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{g_2}{R_1\cdot R_2}\right).$$



Фиг. 140.

Соответствующим подбором сопротивлений можно свести K к незначительной величине.

Графический вывод формул для измерения емкости и самоиндукции дал Кениг (König)[2].

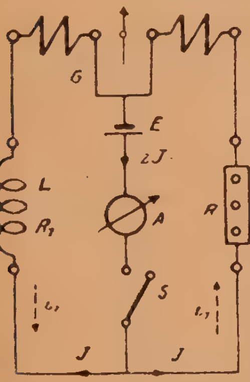
[1]) Bull. Bur. Stand. 433 (1907); ZFJ. 312 (1908) рефер.).
[2]) El. Anz, 361, 381 (1904).

41. Измерение самоиндукции[1]).

а) Баллистическим дифференциальным гальванометром.

Самоиндукция L катушки без железа измеряется по эл. дв. силе, индуктирующейся в ней, когда сила тока уменьшается на единицу, за единицу времени, по уравнению

$$E_{st} = -L\cdot\frac{dJ}{dt}\ .$$



Фиг. 141.

Если напряжение было измерено в вольтах и ток в амперах, то L получим в генри, при чем 1 генри $= 10^9$ абсолютн. единиц (сантиметров).

В данном случае для измерения применен баллистический дифференциальный гальванометр, его мы включаем по схеме фиг. 141., при чем должны быть выполнены условия, указанные в § 6. Если замкнем ключ S, то через амперметр A потечет ток $2J$, который равномерно разделится на две ветви, так как последние должны иметь одинаковые сопротивления. При размыкании ключа исчезающий ток J вызовет эл. дв. силу самоиндукции

$$E_{st} = -L\cdot\frac{dJ}{dt}\,,$$

которая пошлет в цепь ток i_1, при чем гальванометр отклонится, так как ток i_1 пройдет через его катушки в одном и том же напра-

влении. Далее, сопротивление катушки самоиндукции должно быть $R_1 = R$ и отсюда суммарное сопротивление

$$R_{сум.} = 2R + 2g.$$

где g обозначает сопротивление одной катушки гальванометра. По второму закону Кирхгофа

$$E_{st} = -L \cdot \frac{dJ}{dt} = i_{1t} \cdot R_{сум.}$$

или
$$-L \cdot \int_J^0 dJ = \int_0^t i_{1t} \cdot dt \cdot R_{сум.}$$

Из чего следует $L \cdot J = Q \cdot R_{сум.}$ или

$$L = \frac{2Q \cdot (R + g)}{J}.$$

В этой формуле количество электричества Q может быть определено по отклонению s из уравнения

$$Q = c_1 \cdot \frac{T}{\pi} \cdot s \cdot \left[k^{\frac{1}{\pi} \cdot \operatorname{arctg.} \frac{\pi}{\Lambda}} \right],$$

или с помощью конденсатора, если известно количество электричества, которое соответствует отклонению на одно деление шкалы. При практическом осуществлении измерения сопротивление R должно быть строго безиндукционно. Далее еще следует испытать не влияет ли на измерение самоиндукция катушек гальванометра; для этого на место L включают безиндукционное сопротивление, тогда при замыкании и размыкании ключа S гальванометр должен не давать отклонения.

Шапен (Chapin) [2], измеряет самоиндукцию с помощью обыкновенного дифференциального гальванометра, для чего он включает индукционное сопротивление W_1 последовательно с безиндукционным R_2, а затем параллельно тому и другому включает по катушке гальванометра. При постоянном токе, при определенном сопротивлении R_2, прибор не дает отклонения. Напротив, при переменном токе J, в катушке, соединенной с W_1 действует эл. дв. сила

$$E_s = J \cdot L \cdot 2\pi \cdot \nu,$$

которая вызывает отклонение α, откуда можно вычислить

$$L = \frac{c \cdot \alpha}{J \cdot 2\pi \cdot \nu},$$

если определить постоянную c с помощью известной самоиндукции.

b) Дифференциальным электрометром.

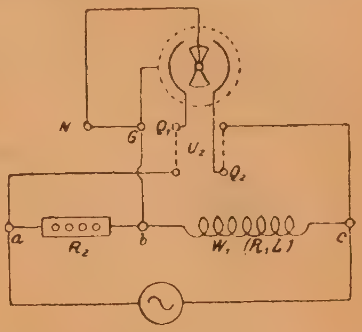
(Жубер — Joubert) [3].

Исследуемое сопротивление $W_1 = \sqrt{R_1^2 + L^2 \cdot \omega^2}$ включается последовательно с безиндукционным сопротивлением R_2 и присоединяется к клеммам электрометра по схеме фиг. 142.

R_2 регулируют до тех пор, пока прибор не станет давать одно и то же отклонение при обоих положениях U_2, тогда напряжение $E_{ab} = E_{bc}$ и

$$R_2 = W_1 = \sqrt{R^2_1 + L^2 \cdot \omega^2}$$

или
$$L = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{R^2_2 - R^2_1}.$$



Фиг. 142.

Чувствительность измерения не велика, если R_1 и R_2 малы. В качестве R_2 можно также применить раствор соли металла [4]) с электродами из того же металла.

Если форма кривой переменного тока не синусоидальна, то нужно, как показали Роза и Гровер [5]), определить амплитуды отдельных гармонических переменного тока, действующего между *a* и *c*.

Если это $J_{1\max}$, $J_{3\max}$ ... $J_{n\max}$, то

$$E^2_{ab} = \frac{R^2_2}{2} \cdot \left(J_1{}^2_{\max} + J^2_{3\max} + \ldots J_n{}^2_{\max}\right)$$

$$E^2_{bc} = \frac{R_1{}^2}{2} \cdot \left(J_1{}^2_{\max} + J^2_{3\max} + \ldots J_n{}^2_{\max}\right),$$

$$+ L^2 \cdot \omega^2 \cdot \left(J_1{}^2_{\max} + 9J^2_{3\max} + \ldots n^2 \cdot J_n{}^2_{\max}\right)$$

Приравнивая получаем:

$$L = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{R^2_2 - R_1{}^2} \cdot \sqrt{\frac{J_1{}^2_{\max} + J_3{}^2_{\max} + \ldots J_n{}^2_{\max}}{J_1{}^2_{\max} + 9 \cdot J_3{}^2_{\max} + \ldots n^2 \cdot J_n{}^2_{\max}}}$$

или
$$L = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{R_2{}^2 - R_1{}^2} \cdot k_s,$$

где поправочный множитель k_s определяется посредством анализа кривой переменного тока. При небольших отклонениях от синусоидальной формы трудно определить высшие гармонические. В этом случае целесообразно включить к *a c* конденсатор *C* последовательно с безиндукционным сопротивлением и анализировать на нем ток заряда, отдельные амплитуды которого $i_{1\max}$, $i_{2\max}$, $i_{n\max}$ усиливаются благодаря влияиию конденсатора. При этом для *n*-ной гармонической, если определено $i_{n\max}$, имеем:

$$J_{n\max} = \frac{E_{n\max}}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + n^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}}$$

$$E_{n\max} = \frac{i_{n\max}}{n \cdot \omega \cdot C}.$$

Соединив оба уравнения получим:

$$J_{n\max} = \frac{i_{n\max}}{n \cdot \omega \cdot C \cdot \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + n^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}}$$

однако не зная множителя k_s можно определить L только приближенно. Далее не требуется знать C, так как оно выпадает в формуле для k_s; затем нужно знать только относительную величину $J_{n\,\max}$ и $i_{n\,\max}$, так как нам нужно только их отношение.

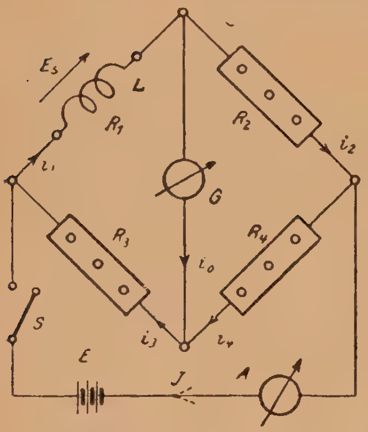
Для высокого числа периодов этот метод применим лишь в том случае, когда сопротивление R_1 не зависит от частоты, т.-е. безиндукционно и не обладает емкостью.

1) Сравн. M. Wien Wied. Ann. 689 (1891); 928 (1894); 870 (1898).
2) El. World 8. Febr (1908); El. и M. Wien. 228 (1908) (рефер.).
3) Compt. rend. 161 (1880).
4) Phys. Z 15 Sept. (1907); Ecl. El. 33 (1907); Ann. d. El. 480 (1907).
5) Bull. Bur. Stand. 125 (1905); Zf.J. 46 (1906) (рефер.).

42. Измерение самоиндукции мостиком.

(Максвелл).

Катушка, имеющая самоиндукцию L и уаттное сопротивление R_1; три безиндукционных сопротивления R_2, R_3, R_4; амперметр A, элемент E и баллистический гальванометр G соединяются по схеме фиг. 143.



Фиг. 143.

Замыкают ключ S и регулируют сопротивления так, чтобы гальванометр не показывал отклонения. Тогда через амперметр A протекает ток J, а через катушку самоиндукции ток i. Если разомкнуть ключ S, то исчезающий ток i возбудит в катушке эл. дв. силу самоиндукции

$$E_{st} = -L \cdot \frac{di}{dt},$$

которая пошлет некоторое количество электричества через сопротивления и гальванометр. Если обозначить сопротивление всей цепи через W, то

$$-L \cdot \frac{di}{dt} - L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} = i_{1t} \cdot W,$$

где L_0—коэффициент самоиндукции гальванометра и i_1, i_2, i_3, i_4 и i_0—токи вызванные E_s в сопротивлениях и в гальванометре. Общее сопротивление W состоит из последовательно включенных сопротивлений R_1, R_3 и ρ, при чем ρ обозначает общее сопротивление G и $R_2 + R_4$.

Теперь
$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{R_2 + R_4} + \frac{1}{G} = \frac{G + R_2 + R_4}{G \cdot (R_2 + R_4)}$$

или
$$\rho = \frac{G \cdot (R_2 + R_4)}{G + R_2 + R_4}.$$

отсюда
$$W = R_1 + R_3 + \rho = R_1 + R_3 + \frac{G \cdot (R_2 + R_4)}{G + R_2 + R_4}.$$

Кроме того, должны иметь место отношения:

$$i_{1t} = i_{3t} = i_{0t} + i_{4t} = i_{0t} + i_{2t}$$

и $$i_{0t} \cdot G = i_{2t} \cdot (R_2 + R_4) \text{ или, так как } i_{2t} = i_{1t} - i_{0t},$$

$$i_{0t} \cdot G = (i_{1t} - i_{0t}) \cdot (R_2 + R_4),$$

из чего следует $$i_{1t} = i_{0t} \cdot \frac{(G + R_2 + R_4)}{R_2 + R_4}.$$

Если теперь подставим в уравнение

$$-L \cdot \frac{di}{dt} - L_0 \cdot \frac{di}{dt} = i_{1t} \cdot W$$

значения для i_1 и W, то получим:

$$-L \cdot \frac{di}{dt} - L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} = i_{0t} \cdot \frac{G + R_2 + R_4}{R_2 + R_4} \cdot \left(R_1 + R_3 + \frac{G \cdot (R_2 + R_4)}{G + R_2 + R_4}\right).$$

Умножив на dt и проинтегрировав, находим, взяв пределы

$$-L \cdot \int_i^0 di - L_0 \cdot \int_0^0 di_0 =$$

$$= \int_0^t i_{0t} \cdot dt \cdot \frac{G + R_2 + R_4}{R_2 + R_4} \cdot \left(R_1 + R_3 + \frac{G \cdot (R_2 + R_4)}{G + R_2 + R_4}\right).$$

Подставив

$$-L \cdot \int_i^0 di = L \cdot i, \quad L_0 \cdot \int_0^0 di_0 = 0 \quad \text{и} \quad \int_0^t i_{0t} \cdot dt = Q_0,$$

найдем:

$$L \cdot i = Q_0 \cdot \left(\frac{G + R_2 + R_4}{R_2 + R_4}\right) \cdot \left(R_1 + R_3 + \frac{G \cdot (R_2 + R_4)}{G + R_2 + R_4}\right),$$

или $$L \cdot i = Q_0 \cdot \left(G + R_2 + R_4\right) \cdot \left(\frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} + \frac{G}{G + R_2 + R_4}\right).$$

Здесь $$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad \text{или} \quad \frac{R_1 + R_3}{R_3} = \frac{R_2 + R_4}{R_4},$$

из чего следует $$\frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Это значение подставим в последнее уравнение, тогда получим:

$$L \cdot i = Q_0 \cdot \left(G + R_2 + R_4\right) \cdot \left(\frac{R_3}{R_4} + \frac{G}{G + R_2 + R_4}\right) =$$

$$= Q_0 \cdot \frac{R_3 \cdot (G + R_2 + R_4) + G \cdot R_4}{R_4} =$$

$$= Q_0 \cdot \left[\frac{G \cdot (R_3 + R_4) + R_3 \cdot (R_2 + R_4)}{R_4}\right]$$

и наконец $$L \cdot i = Q_0 \cdot R$$

или $$L = \frac{Q_0 \cdot R}{i},$$

где $$R = \frac{G \cdot (R_3 + R_4) + R_3 \cdot (R_2 + R_4)}{R_4}.$$

Количество электричества Q_0, протекшее через гальванометр измеряется отклонением, показанным гальванометром. Ток i определится из следующего соотношения: при замкнутом ключе общий ток J делится на i и i', тогда $J = i + i'$ и

$$i' \cdot (R_3 + R_4) = (J - i) \cdot (R_3 + R_4) = i \cdot (R_1 + R_2);$$

из чего следует $$i = \frac{J \cdot (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$

Подставив это значение в выражение для L получим:

$$L = \frac{Q_0}{J} \cdot R \cdot \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{R_3 + R_4},$$

где ток J определяется по показанию амперметра.

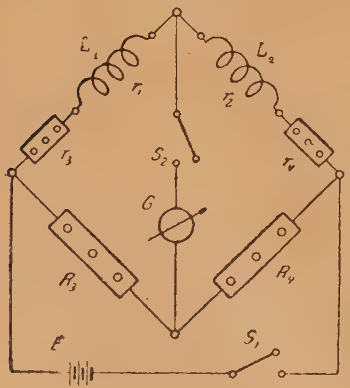
Сходный метод дал Капп [1]).

[1]) El. Juni (1909).

43. Сравнение самоиндукций между собой.

(Максвелл).

Для этого измерения пользуются включением по схеме фиг. 144. L_1 и L_2 коэффициенты самоиндукции двух катушек, r_1 и r_2 их сопротивления при постоянном токе, r_3, r_4, R_3, R_4 безиндукционные регулируемые сопротивления. Если обозначим



Фиг. 144.

$$r_1 + r_3 = R_1 \text{ и } r_2 + r_4 = R_2$$

то, при отсутствии тока в мостике (т.-е. в ветви гальванометра), при постоянном токе

I. $$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3,$$

при переменном токе

II. $$W_1 \cdot R_4 = W_2 \cdot R_3.$$

Далее

$$W_1 = \sqrt{R_1^2 + L_1^2 \cdot \omega^2}$$

и

$$W_2 = \sqrt{R_2^2 + L_2^2 \cdot \omega^2}.$$

Оба уравнения должны иметь место одновременно, так что подстановкою значений W_1 и W_2 в уравнение II на основании уравнения I, получим:

$$R_4 \cdot \sqrt{R_1^2 + L_1^2 \cdot \omega^2} = R_3 \cdot \sqrt{R_2^2 + L_2^2 \cdot \omega^2}$$

или

$$R_1^2 \cdot R_4^2 + L_1^2 \cdot \omega^2 \cdot R_4^2 = R_2^2 \cdot R_3^2 + L_2^2 \cdot \omega^2 \cdot R_3^2.$$

Из уравнения I-го

$$R_1^2 \cdot R_4^2 = R_2^2 \cdot R_3^2,$$

поэтому оба эти члена выпадают и по сокращении ω^2 остается только

$$L_1^2 \cdot R_4^2 = L_2^2 \cdot R_3^2$$

или

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Доказательство можно вывести также следующим образом: если при размыкании или замыкании ключа S_1 гальванометр не дает отклонения, то кроме отношения

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$$

напряжения в ветвях будут относиться так же, как сопротивления так что

$$E_{1t} \cdot E_{4t} = E_{2t} \cdot E_{3t}.$$

Далее

$$E_{1t} = J_{1t} \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{dJ_1}{dt}, \qquad E_{2t} = J_{2t} \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt}.$$

$$E_{3t} = J_{3t} \cdot R_3 \qquad E_{4t} = J_{4t} \cdot R_4.$$

Подстановкой получим

$$\left(J_{1t} \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{dJ_1}{dt}\right) \cdot J_{4t} \cdot R_4 = \left(J_{2t} \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt}\right) \cdot J_{3t} \cdot R_3.$$

Это уравнение действительно для любого момента. Поэтому при отсутствии тока в гальванометре $J_{1t} = J_{2t}$ и $J_{3t} = J_{4t}$, и соответствующие дифференциалы

$$\frac{dJ_1}{dt} = \frac{dJ_2}{dt}.$$

Сократив на $J_{3t} = J_{4t}$ и раскрыв скобки получим:

$$J_{1t} \cdot R_1 \cdot R_4 + L_1 \cdot \frac{dJ_1}{dt} \cdot R_4 = J_{2t} \cdot R_2 \cdot R_3 + L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt} \cdot R_3.$$

Здесь

$$J_{1t} \cdot R_1 \cdot R_4 = J_{2t} \cdot R_2 \cdot R_3$$

почему также:

$$L_1 \cdot \frac{dJ_1}{dt} \cdot R_4 = L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt} \cdot R_3,$$

Сократим дифференциалы, так как они равны, тогда остается

$$L_1 \cdot R_4 = L_2 \cdot R_3$$

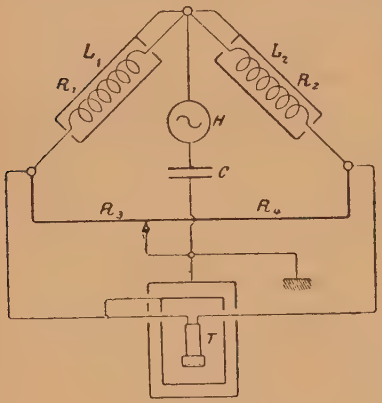
или как и прежде

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Для более точного измерения можно, на место батареи E и ключа S_1, включить источник переменного тока и вместо гальвано-

метра G, при высокой частоте или синусональном токе, включить телефон, при токе же не очень высокой частоты--вибрационный гальванометр (до 450 пер/сек., сравн. § 26). Точнее всего работа мостика при $L_1 = L_2$ и $R_3 = R_4$, так как в этом случае легко избежать ошибок от возможной небольшой самоиндукции [1]) сопротивлений r_3, r_4, R_3, R_4. Каким образом определить поправку на эти влияния при малых самоиндукциях подробно указано Гибе (Giebe) [2]). Он же сконструировал бифилярный мостик, специально приспособленный для высоких частот с отношением ветвей мостика 1 : 10.

Вторым источником ошибок является емкость всей измерительной установки по отношению к земле. Чтобы избежать влияния появляющегося, вследствие этой емкости, зарядного тока,—индукционные катушки помещают в футляры (фиг. 145), сделанные из проводящего материала [3]); эти футляры соединяют проводниками с соответствующими точками мостика. Нет нужды знать емкость футляров так как они включены параллельно соединению и потому не оказывают влияния на ветвь телефона. Далее, целесообразно выбрать, по возможности, малые R_3 и R_4 и пользоваться сопротивлениями, катушки которых не содержат металлических трубок, или лучше заменить R_3 и R_4 измерительной проволокой с ползушкой.



Фиг. 145.

Телефон также закрывается кожухом и, во избежание влияния емкости по отношению к индуктивным ветвям *1* и *2*, помещается еще во второй заземленный футляр. Через оба эти футляра к телефону ведет стеклянная трубка; футляры внутри покрыты станиолем, подразделенным во избежание токов Фуко. Конденсатор C, включенный последовательно с источником тока высокой частоты H (до 800 пер/сек), служит для настройки на резонанс. С помощью этого включения можно также определять индукцию рассеяния [4]) трансформаторов.

Для практического употребления фирмы Siemens & Halske[5]) и Hartmann & Braun [6]) изготовляют аппараты для сравнения самоиндукций по этому методу, как это предложил Долезалек [7]).

В качестве эталона для сравнения употребляют, предложенные М. Вином [8]), короткие плоские катушки, из тонких подразделенных ленточек, навитых на мраморные основания. Кроме того пользуются так называемыми вариометрами самоиндукции М. Вина [9]) или сходной конструкции Хаусрата [10]). Они состоят из двух катушек, включенных последовательно, и пространственно сдвигающихся или поворачивающихся по отношению друг к другу. Благодаря такому устройству можно в определенных границах получить любую величину самоиндукции и плавно изменять ее.

По Hohage [11]) сравнение самоиндукций в мостике можно также производить с помощью шайбы Жубера, по Ларсену [12]), комплексным компенсатором. Сумпнер (Sumpner) и Филиппс (Philipps)[13],) а также Шарп (C. H. Sharp) и Кроуфорд (W. Crawford) [14]) предложили методы и аппараты для измерения самоиндукции и емкости.

М. Вин несколько изменил метод, рассмотренный в этом параграфе, для того, чтобы применить его для абсолютного измерения самоиндукции. Именно, он включил параллельно исследуемой катушке безиндукционное сопротивление, благодаря чему измерение сводится к определению безиндукционного сопротивления и частоты переменного тока, как это подробно на примерах пояснил Орлих [15]. По Гиббону (Gibbon) [16]) это включение может быть применено для измерения переменных токов путем сравнения с постоянным током в виде компенсационного включения.

В заключение я еще упомяну о том, что для сравнения самоиндукций можно также применять фазометр [17]), квадрантный электрометр [18]), весы [19]) и воспользоваться резонансом между самоиндукцией и емкостью.

---

1) Zfl. 147 (1908) (PTR).
2) Ann. d. Ph. 941 (1907); Zfl. 196 (1908) (рефер.).
3) Zfl. 150 (1909) (PTR).
4) ETZ. 1334 (1910).
5) ETZ. 519 (1911).
6) Druckschrift. (105).
7) Zfl. 245 (1903).
8) Wied. Ann. 553 (1896); Ann. d. Ph. 1142 (1903).
9) Wied. Ann. 249 (1896); ETZ. 560 (1909) (Kollert).
10) Zfl. 302 (1907).
11) ETZ. 828 (1903).
12) ETZ. 1039 (1910).
13) El. 24 Juni (1910).
14) Proc. AIEE. 1207 (1910).
15) ETZ. 502 (1903).
16) El. World. (71) 979; ETZ. 9 (1919).
17) ETZ. 569 (1897).
18) Orlich, Kapazität und Induktivität, 274.
19) Peukert, ETZ. 922 (1905); 257 (1906); 182, 332 (1912).

---

44. Сравнение самоиндукций посредством дифференциального телефона.

Фирма Land uud Seekabelwerken Köln-Nippes изготовляет прибор, позволяющий сравнивать две самоиндукции с помощью дифференциального телефона. Последний был введен в употребление Но [1]), Duane и Lory [2]). Телефон состоит из двух одинаковых обмоток с одним и тем же сопротивлением при постоянном токе, одной и той же самоиндукцией и одинаковым действием на мембрану. При опыте каждая катушка включается в одну из двух ветвей разветвления, каждое разветвление состоит из включенных последовательно самоиндукции L и безиндукционного сопротивления r. Составив схему мостика Уитстона, при постоянном токе, добиваемся равенства сопротивления ветвей $R_1 = r_1 + r_{S1} + r_{T1}$, и R_2, (r_S и r_T уаттные сопротивления катушек самоиндукции и телефона). Затем включаем разветвление к источнику переменного тока и регулируем эталон самоиндукции L_2 до тех пор, пока телефон, катушки которого включены навстречу, не замолчит. Тогда

$$L_1 = L_2.$$

Так как очень трудно добиться отсутствия звука в телефоне, то Троубридж (Trowbridge) [3]) поместил обе дифференциальные обмотки

в трансформатор в качестве его первичных витков, ко вторичной же его обмотке приключил обыкновенный телефон.

С помощью такого дифференциального трансформатора можно по Хаусрату [4]), измерять самоиндукцию катушек с железом в машинах и трансформаторах [5]).

---

[1]) El. 751 (1903); El. Anz. 1841 (1903) (рефер.).
[2]) Phys. Rev. 275 (1904).
[3]) Phys. Rev. 65 (1905); ZfJ. 220 (1905) (рефер.).
[4]) Die Untersuchung elektr. Systeme, 61 (Springer 1907).
[5]) Niebuhr, Experimentaluntersuchungen, 5 (Spinger 1907).

---

45. Сравнение самоиндукции с емкостью.

(Максвелл).

Катушка с самоиндукцией L и сопротивлением r соединяется с четырьмя безиндукционными сопротивлениями r_1, R_2, R_3, R_4 и гальванометром G по схеме, изображенной на фиг. 146.

Параллельно R_4 включается конденсатор емкостью C. Если замкнуть ключ S, то, при постоянном токе, если гальванометр не дает отклонения, должно иметь место равенство $(r+r_1)\cdot R_4 = R_2\cdot R_3$ или, если обозначить $r+r_1 = R_1$, то

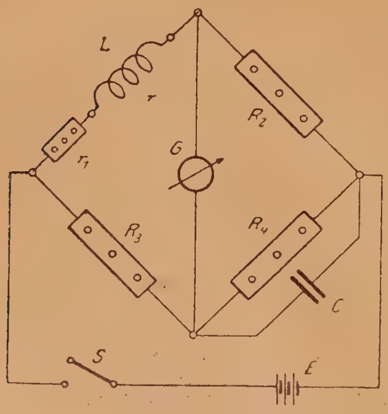
$$\text{I.} \quad R_1\cdot R_4 = R_2\cdot R_3 \ .$$

Если разомкнуть S, то гальванометр не покажет отклонения только тогда, когда действия емкости и самоиндукции взаимно уничтожаются.

Для переменного тока, должно иметь место отношение

$$\text{II.} \quad Z_1\cdot Z_4 = Z_2\cdot Z_3,$$

где Z_1 и Z_4 обозначают сопротивления при переменном токе, при чем под Z_4 понимается общее сопротивление безиндукционного сопротивления R_4 и емкости C.



Фиг. 146.

При этом

$$Z_4 = \frac{R_4}{\sqrt{1+C^2\cdot\omega^2\cdot R^2_4}}$$

$$Z_2 = R_2 \ , \ W_3 = R_3$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1{}^2 + L^2\cdot\omega^2} \ .$$

Путем подстановки этих значений в уравнение II и об‘единения с уравнением I получим

$$\sqrt{R^2_1+L^2\cdot\omega^2}\cdot\frac{R_4}{\sqrt{1+C^2\cdot\omega^2\cdot R^2_4}} = R_2\cdot R_3$$

или

$$R^2_4\cdot(R^2_1+L^2\cdot\omega^2) = R^2_2\cdot R^2_3\,(1+ + C^2\cdot\omega^2\cdot R^2_4).$$

Отсюда, путем сокращения на

$$\omega^2\cdot R^2_4 \text{ и } R^2_2\cdot R^2_3 = R^2_1\cdot R^2_4$$

далее получаем:

$$L^2 = C^2 \cdot R^2_2 \cdot R^2_3$$

или

$$\mathbf{L = C \cdot R_2 \cdot R_3} \;.$$

Этот метод применим только тогда, когда $L \cdot \omega$ велико по сравнению с r. Целесообразно брать R_4 больше ($>5000\,\Omega$), R_2 и R_3 меньше ($<200\,\Omega$) и r_1—малое и заменять E источником переменного тока, а G телефоном или вибрационным гальванометром. При малых значениях L и C нужно вводить поправку на емкость эталонных сопротивлений. Проще всего определить эту поправку, отключив L и C и включив сопротивление r, эквивалентное сопротивлению L, а затем при таком соединении, произвести измерение. Если гальванометр покажет отклонение, то это отклонение и есть нулевое положение для дальнейшего опыта.

При практическом осуществлении трудно подобрать в мостике отношения сопротивлений, удовлетворяющие I и II уравнениям, т. к. изменение сопротивления для того, чтобы оно отвечало, например, условиям уравнения I, одновременно нарушает условия уравнения II. Этот недостаток устранен в схеме Форсайта (Forsythe) [1], в которой в ветви 4 параллельно включены емкости C и самоиндукция L, каждая последовательно с дополнительным сопротивлением, а перед этим разветвлением включено еще одно сопротивление.

[1]) Phys. Rev. 463 (1913); ETZ. 1466 (1913).

46. Сравнение самоиндукции с емкостью.

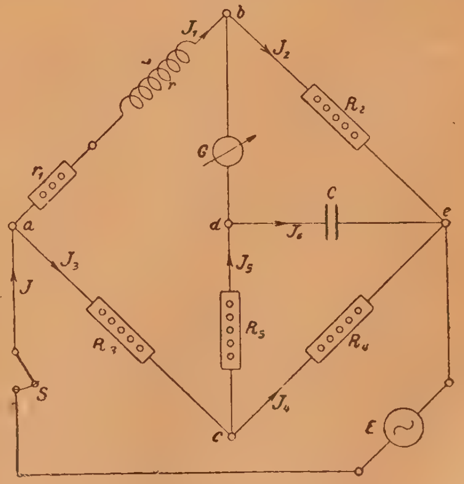
(Андерсон) [1]).

Из фиг. 147 видно, что этот метод представляет собой, в общем, удачное изменение метода Максвелла (§ 45) путем включения сопротивления R_5 между гальванометром и сопротивлением R_4. Сначала добиваются отсутствия тока в G при постоянном токе; для чего нужно, чтобы

$$\text{I.} \quad R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \;,$$

где $R_1 = r_1 + r$. После чего включают источник переменного тока E и, на место G, прибор для переменного тока (телефон или вибрационный гальванометр), затем регулируют R_5 до тех пор, пока в G не исчезнет ток; тогда имеем соотношения:

1. $E_{ab} = E_{acd}$ 2. $E_{be} = E_{de}$
3. $E_{ce} = E_{cde}$ 4. $J_1 t = J_2 t$
5. $J_5 t = J_6 t$ 6. $J_3 t = J_4 t + J_5 t$



Фиг. 147.

Из чего следует:

$$\text{II.} \quad J_{1t} \cdot R_1 + \frac{L \cdot dJ_1}{dt} = J_{3t} \cdot R_3 + J_{5t} \cdot R_5$$

$$\text{III.} \quad J_{2t} \cdot R_2 = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t J_{6t} \cdot dt$$

$$\text{IV.} \quad J_{4t} \cdot R_4 = J_{5t} \cdot R_5 + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t J_{6t} \cdot dt \quad .$$

Разделив II на III и поставив в результат J_{3t} из уравнения 6 и J_{4t} из уравнения 4 получим

$$\frac{J_{1t} \cdot R_1 + L \cdot \frac{dJ_{1t}}{dt}}{J_{2t} \cdot R_2} = \frac{J_{5t} \cdot \left(\frac{R_3 \cdot R_5}{R_4} + R_3 + R_5 \right)}{\frac{1}{C} \int_o^t J_{6t} \cdot dt} + \frac{R_3}{R_4} \quad .$$

преобразуем

$$R_4 \cdot R_1 \cdot \left(1 + \frac{L}{J_{2t} \cdot R_1} \cdot \frac{d\, J_{1t}}{dt} \right) = R_2 \cdot R_3 \cdot \left[\frac{\left(R_5 + R_4 + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3} \right) \cdot J_{5t}}{\frac{1}{C} \cdot \int_o^t J_{6t} \cdot dt} + 1 \right]$$

сокращая на основании уравнения I, получаем

$$L \cdot \frac{d\, J_{1t}}{dt} = \frac{R_1}{R_3} \cdot (R_3 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_5 + R_4 \cdot R_5) \cdot \frac{J_{2t} \cdot J_{5t}}{\frac{1}{C} \cdot \int_o^t J_{6t} \cdot dt}$$

подставив J_{2t} из III уравнения, из I $\quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$ и $J_{5t} = J_{6t}$

имеем

$$L \cdot dJ_{1t} = \left(R_3 + R_5 \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_4} \right) \cdot J_{6t} \cdot dt$$

интегрируем

$$L \cdot J_1 = \left(R_3 + R_5 \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_4} \right) \cdot \int_o^t J_{6t} \cdot dt$$

откуда на основании уравнения III и равенства 4

$$L = C \cdot R_2 \left(R_3 + R_5 \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_4} \right) .$$

При этом, при постоянном токе, R_2 и R_3 должны быть подобраны так, чтобы удовлетворять условию

$$R_2 \cdot R_3 < \frac{L}{C}$$

Если в нашем включении поменять местами источник тока E и гальванометр G, то получится метод Stroud'a и Oates'a[2]) с тем же уравнением. Если мы переставим R_4 и C, то получим схему Илиовичи (Jliovici)[3]); для которой соотношения будут:

$$\text{I.} \quad R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot (R_3 + R_5)$$

$$\text{II.} \quad L = C \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \frac{R_4 + R_5}{R_4} \quad .$$

В качестве измерительного прибора может также служить гальванометр переменного тока Тэйлора[4]) с системой подвижных катушек или гальванометр Абраама (Abraham)[5]).

Этот метод приобретает большую точность, если подобрать $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ и взять среднее значение из результатов этого и второго измерения после перемены местами R_3 и R_4. Таким путем Роза и Гровер[6]), а также Тэйлор (Taylor) и Вилльямс (Williams)[7]) измеряли небольшую емкость катушек сопротивлений и исследовали, какое влияние окажет небольшая самоиндукция в R_1 и R_2. Равным образом, при этом можно легко и точно определить ошибку, вызываемую влияниями: диэлектрической абсорпции конденсатора, которую можно представить в виде добавочного сопротивления, а также влияния плохой изоляции, которая равносильна параллельно включенному сопротивлению. Пользуясь эталоном самоиндукции и известной емкостью можно сравнивать, по способу замещения, емкости между собой.

---

1) Phil. Mag. 329 (1891).
2) Phil. Mag. 707 (1903).
3) Compt. rend. 1411 (1904).
4) Phys. Rev. 61 (1907).
5) Compt. rend. 993 (1906); ZfJ. 350 (1906) (рефер.).
6) Bull. Bur. Stand. 291, 306 (1905).
7) Phys. Rev. 417 (1908); ZfJ. 313 (1908).

47. Измерение взаимоиндукции.

Взаимоиндукция M двух проводников измеряется (аналогично L) по эл. дв. силе, индуктируемой в одном проводнике, когда в другом ток J убывает на единицу, за единицу времени по уравнению

$$E_t = -M \cdot \frac{dJ}{dt} \cdot$$

Для измерения пользуются схемой фиг. 148.

Для регулирования тока J_1 служит сопротивление r; S—ключ для цепи тока, A—амперметр, R_2—сопротивление катушки II, G—баллистический гальванометр. Если разомкнуть в S цепь источника постоянного тока E, то исчезающий ток J_1 (в катушке I) вызовет в катушке II эл. дв. силу взаимоиндукции

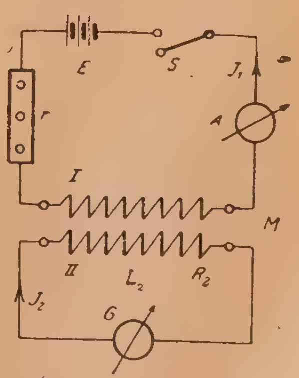
$$E_t = -M \cdot \frac{dJ_1}{dt} \cdot$$

Эта эл. дв. сила вызовет в катушке II ток J_2, а он потерю напряжения $J_2 \cdot (R_2 + G)$ и эл. дв. силу самоиндукции

$$E_{st} = -L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt} \cdot$$

По закону Кирхгофа тогда должно иметь место отношение

$$-M \cdot \frac{dJ_1}{dt} = J_{2t} \cdot (R_2 + G) - L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt} \cdot$$



Фиг. 148.

Проинтегрировав и взяв пределы получим:

$$-M\cdot\int_{J_1}^{0} dJ_1=(R_2+G)\cdot\int_0^t J_{2t}\cdot dt-L_2\cdot\int_0^0 dJ_2$$

или

$$M\cdot J_1=(R_2+G)\cdot Q\ ,\ \text{где}\ Q=\int_0 J_{2t}\cdot dt$$

есть количество электричества, протекшее через гальванометр. Отсюда следует

$$M=(R_2+G)\cdot\frac{Q}{J_1}=\frac{(R_2+G)}{J_1}\cdot c_1\cdot\frac{T}{\pi}\cdot S\cdot(1+1{,}16\ log\ \ k)\ .$$

Если пользоваться вместо S переключателем и изменять ток $+J_1$ через O на $-J_1$, то формула будет

$$M=\frac{R_2+G}{2J_1}\cdot Q\ .$$

---

48. Измерение взаимоиндукции.

(Троубридж) [1])

Две катушки, взаимоиндукцию которых нужно измерить, включают сначала последовательно, так, чтобы их поля имели одинаковое направление, и измеряют самоиндукцию L_a этой комбинации. Затем включают обе катушки навстречу и измеряют опять самоиндукцию L_b. Если катушки порознь имеют самоиндукцию L_1 и L_2, то, при токах J_1 и J_2, будут иметь место следующие отношения:

$$L_a\cdot\frac{dJ_1}{dt}=L_1\cdot\frac{dJ_1}{dt}+L_2\cdot\frac{dJ_1}{dt}+2\cdot M\cdot\frac{dJ_1}{dt}$$

$$L_b\cdot\frac{dJ_2}{dt}=L_1\cdot\frac{dJ_2}{dt}+L_2\cdot\frac{dJ_2}{dt}-2\cdot M\cdot\frac{dJ_2}{dt}$$

или

$$L_a=L_1+L_2+2\ M$$
$$L_b=L_1+L_2-2\ M\ .$$

Посредством вычитания получим:

$$M=\frac{L_a-L_b}{4}\ .$$

Измерение тем точнее, чем меньше разнятся L_1 и L_2,

[1]) Phys. Pev. 184 (1904); ZfJ. 223 (1904).

---

49. Сравнение взаимоиндукции с емкостью.

Пирани (Pirani) и Роити (Roiti).

Включают, по прилагаемой схеме (фиг. 149), катушку с обмотками I и II и взаимоиндукцией M, конденсатор C, безиндукционные сопротивления R_1 и R_2, гальванометр G, источник тока E и ключ S.

Если замкнуть S, то пойдет ток J, и конденсатор зарядится, благодаря разности потенциалов на концах сопротивления R_1

$$E_1 = J_1 \cdot R_1 ,$$

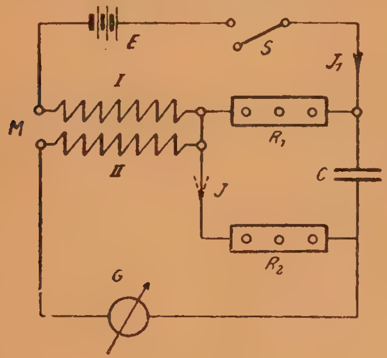
равной разности потенциалов на его обкладках, количеством электричества

$$Q_1 = E_1 \cdot C = J_1 \cdot R_1 \cdot C$$

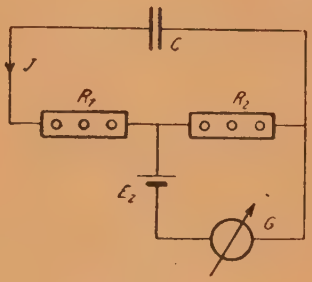
Если же разомкнуть ключ S, то в катушке II появится эл. дв. сила

$$E_2 = -M \cdot \frac{dJ_1}{dt} .$$

Одновременно конденсатор разрядится через сопротивления R_1 и R_2. Если разрядный ток J конденсатора даст в сопротивлении R_2 падение напряжения $J \cdot R_2$ равное индуктированной эл. дв. силе E_2, то они оба компенсируются и гальванометр не покажет отклонения.



Фиг. 149.



Фиг. 150.

Поэтому в данном случае можно рассуждать также, как при определении эл. дв. силы компенсационным методом (фиг. 150).

Именно

$$E_{2t} = -M \cdot \frac{dJ_1}{dt} = J_t \cdot R_2$$

Отсюда путем интегрирования получаем:

$$-M \cdot \int_{J_1}^{0} dJ_1 = R_2 \cdot \int_{0}^{t} J_t \cdot dt \text{ или } M . J = R_2 \cdot Q,$$

где

$$Q = \int_{0}^{t} J_t \cdot dt$$

количество электричества, отданное конденсатором. Если нет заметных потерь, то Q должно быть равно полученному заряду Q_1 или

$$Q = Q_1 = J_1 \cdot R_1 \cdot C.$$

Поставив это значение для Q получим:

$$M \cdot J_1 = J_1 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C$$

или

$$\mathbf{M = R_1 \cdot R_2 \cdot C.}$$

Если бы самоиндукции обеих катушек *I* и *II* оказались L_1 и L_2, то при проверке должно было получиться $M^2 = L_1 \cdot L_2$. Однако, этого не получается,—вследствие магнитного рассеяния у обеих катушек, всегда

$$M^2 < L_1 \cdot L_2$$

и значение коэффициента магнитного рассеяния σ определяется из уравнения

$$\sigma^2 \cdot M^2 = L_1 \cdot L_2 \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}{M}.$$

Кэмпбелл [1]) дал подобную же схему и метод измерения, применив при этом вибрационный гальванометр.

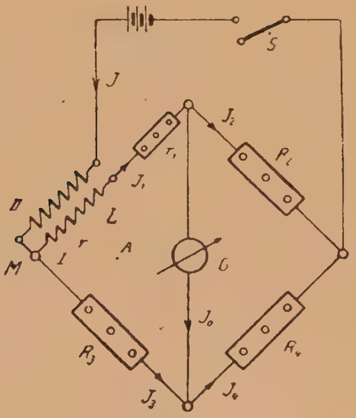
[1]) El. 60 (1907); Phil Mag. 155 (1908) ZfJ. 223 (1908).

50. Сравнение взаимоиндукции с самоиндукцией.

(Максвелл).

В приведенной схеме (фиг. 151) катушка *II* должна быть включена таким образом, чтобы усиливать поле катушки *I*. Если замкнуть ключ *S*, то через катушку *II* потечет ток *J*, который вызовет в катушке *I* эл. дв. силу

$$E_{1t} = -M \cdot \frac{dJ}{dt}.$$



Фиг. 151.

Ток *J* делится на токи J_1 и J_2 и вызывает в катушке *I* эл. дв. силу самоиндукции

$$E_{St} = -L \cdot \frac{dJ_1}{dt}.$$

Поэтому, при изменяющемся токе, для левой части *A* схемы должно иметь место уравнение:

$$M \cdot \frac{dJ}{dt} + \frac{L \cdot dJ_1}{dt} + J_{1t} \cdot R_1 + J_{0t} \cdot G - L_0 \cdot \frac{dJ_0}{dt} - J_{3t} \cdot R_3 = 0,$$

где $R_1 = r + r_1$ и L_0 — самоиндукция гальванометра. Если сопротивления отрегулированы так, что в ветви гальванометра нет тока, то $J = 0$, следовательно

$$J_{0t} \cdot G = 0 \text{ и } L_0 \cdot \frac{dJ_0}{dt} = 0.$$

Далее в этом случае $J_{1t} = J_{2t}$ и $J_{3t} = J_{4t}$.

Уравнение тогда примет следующий вид:

$$\text{I.} \qquad M \cdot \frac{dJ}{dt} + \mathrm{L} \cdot \frac{dJ_1}{dt} + J_{1t} \cdot R_1 - J_{3t} \cdot R_3 = 0.$$

При постоянной силе тока потери напряжения $J_{1t} \cdot R_1$ и $J_{3t} \cdot R_3$ должны быть равны или

$$\text{II.} \qquad J_{1t} \cdot R_1 - J_{3t} \cdot R_3 = 0.$$

Таким образом от уравнения I остается

$$\text{III.} \qquad M \cdot \frac{dJ}{dt} = -L \cdot \frac{dJ_1}{dt}.$$

Здесь $J_t = J_1 + J_{3t}$.

Из уравнения II

$$J_{3t} = J_{1t} \cdot \frac{R_1}{R_3}$$

так что теперь

$$J_t = J_{1t} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right).$$

Путем подстановки этих значений в уравнение III получим

$$M \cdot \frac{dJ_1}{dt} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right) = -L \cdot \frac{dJ_1}{dt}$$

или

$$L = -M \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right) = -M \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_4}\right).$$

В этом случае, конечно, для увеличения точности можно употреблять секомметр.

Если, по Кэмпбеллу [1]), кроме самоиндукци L_1 в ветви *1*, включена еще самоиндукция L_2 в ветвь *3*, то для положения равновесия будем иметь:

$$\frac{L_1 + M}{L_2 - M} = \frac{R_2}{R_4},$$

из чего следует:

$$M = \frac{L_2 \cdot R_2 - L_1 \cdot R_4}{R_2 + R_4}$$

Если сделать $R_2 = R_4$, то получим:

$$M = \frac{L_2 - L_1}{2}.$$

Дальнейшие применения этого метода для измерения самоиндукции предложены также Кэмпбеллом [2]).

---

1) Phil. Mag. 155 (1908), ZfJ. 223 (1908) (рефер.).
2) Nat. phys. Lab. coll. researches 229 (1908).

---

51. Сравнение взаимоиндукций между собой.

(Максвелл).

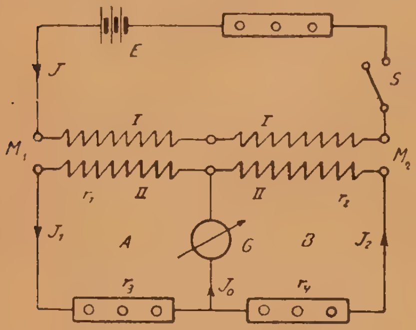
Первичные катушки вариометра взаимоиндукции и измеряемой комбинации катушек, включаются последовательно к источнику переменного тока. Вторичные катушки соединяются в цепь вместе с телефоном или вибрационным гальванометром так, чтобы их эл. дв. силы

действовали на телефон навстречу друг другу. Если, установив вариометр на значение M_2, мы получили отсутствие тока во вторичной цепи, то имеем равенство

$$M_1 = M_2$$

В качестве вариометра может служить прибор, сконструированный Кэмпбеллом [1]). Если же употребляют неизменный эталон взаимоиндукции, состоящий из двух концентрических катушек, то применяют схему фиг. 152.

Первичные и вторичные обмотки соединяются с измерительным прибором G, источником тока E, регулируемым реостатом r, ключем S и сопротивлениями r_3 и r_4 в две цепи.



Фиг. 152.

Если замкнуть или разомкнуть S, то появление тока J возбудит в катушках II эл. дв. силу

$$E_{1t} = -M_1 \cdot \frac{dJ}{dt}$$

и

$$E_{2t} = -M_2 \cdot \frac{dJ}{dt}.$$

Эти эл. дв. силы вызовут токи J_1 и J_2 в обоих ветвях A и B и ток J_0 в гальванометре. Если отрегулировать r_3 и r_4 так, что $J_0 = 0$, то на концах ветви гальванометра будем иметь одинаковый потенциал, и, на основании закона Кирхгофа, получим отношения:

$$\text{I.} \quad M_1 . \frac{dJ}{dt} = J_{1t} \,.\, R_1 \qquad \text{II.} \quad M_2 . \frac{dJ}{dt} = J_{2t} \,.\, R_2,$$

где $R_1 = r_1 + r_3$ и $R_2 = r_2 + r_4$. Поделив оба уравнения одно на другое получим

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{J_{1t} \,.\, R_1}{J_{2t} \,.\, R_2}$$

или, так как при $J_0 = 0$, $J_{1t} = J_{2t}$, то

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{r_1 + r_3}{r_2 + r_4}.$$

В этом случае при постоянном токе опять можно применить секомметр. Во вторичной цепи отношения будут те же, что и при сравнении эл. дв. сил в последовательном включении.

Чтобы иметь право пренебречь влиянием температурных коэффициентов обоих катушек, следует, по возможности, употреблять r_3 и r_4 большие чем r_1 и r_2. Если поменять местами источник электричества и измерительный прибор, то получим схему дифференциального трансформатора (смотри § 44) по Троубриджу.

---

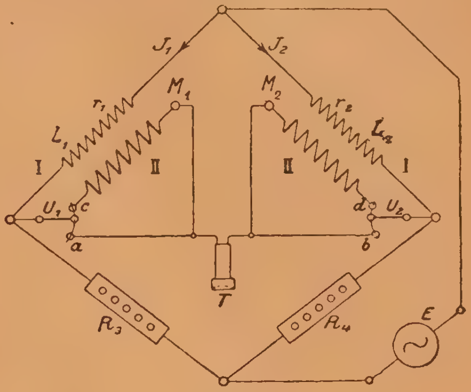
[1]) Phil Mag. 155 (1908); ZfJ. 222 (1908) (рефер.).
[2]) Searle, El 318 (1905); Bull. Bur. Stand. 25 (1908).

52. Сравнение взаимоиндукций между собой.

(Кэмпбелл) [1].

Согласно фиг. 153, сначала ставят переключатели U_1 и U_2 на $a\,b$ и регулируют R_3 и R_4 так, что телефон замолкает. Затем переводят переключатели на $c\,d$ и вновь добиваются равновесия в мостике (отсутствия тока в ветви $a\,b$) с помощью вариометра M_2. Тогда получаем отношение

$$1.\quad M_1 \cdot \frac{dJ_1}{dt} = M_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt}\,.$$



Фиг. 153.

Теперь

$$2.\quad J_1 \cdot R_3 = J_2 \cdot R_4\,.$$

или

$$\frac{dJ_1}{dt} : \frac{dJ_2}{dt} = R_4 : R_3\,.$$

Подставив эти значения в уравнение 1 будем иметь:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

При чем это измерение не зависит от температурных коэффициентов катушек.

[1]) Nat. phys. Lab. coll. researches 223 (1908); Phil. Mag. 155 (1908); ZfJ 223 (1908) (рефер.).

---

53. Сравнение индукций и емкости друг с другом.

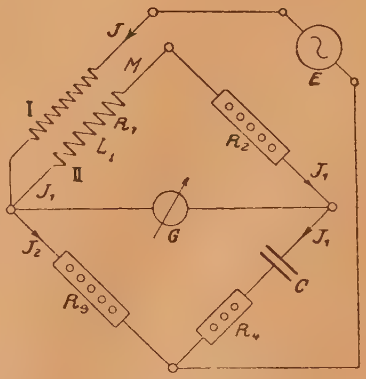
(Carey Forster) [1]).

Пользуясь схемой фиг. 154, можно сравнивать между собой самоиндукцию L, взаимоиндукцию M и емкость C. При отсутствии тока в G имеем отношения:

$$1.\quad J_{1\,t} \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{dJ_1}{dt} + J_{1\,t} \cdot R_2 = M \cdot \frac{dJ}{dt}\,,$$

$$2.\quad J_{2\,t} \cdot R_3 = J_{1\,t} \cdot R_4 + \frac{1}{C}\int_0 J_1 \cdot dt\,,$$

$$3.\quad J_t = J_{1t} + J_2\,.$$



Фиг. 154.

Разделив уравнения 1-е и 2-е одно на другое и соединив с 3-им получим:

$$L_1 = M \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_3}\,,$$

$$C = M \cdot \frac{1}{R_3 \cdot (R_1 + R_2)}$$

Удобно при этом иметь постоянное R_3, а регулировать R_4 и соответственно R_2.

[1]) ZfJ. 217 (1901).

54. Измерение постоянной времени больших сопротивлеиий.

Для точных измерений с помощью переменного тока, особенно при высоком числе периодов ν, эталонные сопротивления должны быть вполне свободны от реакций самоиндукции и емкости, а это невыполнимо для больших сопротивлений, навитых бифилярно или по Чапейрону (Chapeyron)[1]. Для катушек с сопротивлением свыше 10.000 Ω Орлих[2] и Дрейсдаль (Drysdale)[3] предложили особый род обмотки. Новую конструкцию для малых и средней величины сопротивлений и соответствующие методы измерений предложили Куртис и Гровер (Grover)[4] и сходную форму Вагнер и Вертгеймер (Werthéimer)[5].

Если катушка сопротивления при постоянном токе обладает сопротивлением R Ω, самоиндукцией L генри и емкостью C фарад, то при переменном токе, при угловой скорости $\omega = 2\pi.\nu$, будем иметь сдвиг фаз между напряжением и током

$$\operatorname{tg} \varphi = \omega \cdot \left(\frac{L}{R} - C \cdot \quad - \frac{\omega^2 \cdot C \cdot L^2}{R}\right).$$

Емкость при этом рассматриваем, как включенную параллельно. Так как C и особенно L малы, то последним членом можно пренебречь и для малых углов принять

$$tg\,\varphi \cong \varphi = \omega \cdot \left(\frac{L}{R} - C \cdot R\right) = \omega \cdot T$$

где

$$T = T_s - T_c = \frac{L}{R} - C \cdot R$$

называют постоянной времени; она вызывает сдвиг тока по отношению к напряжению на так называемый угол потерь φ.

Для измерения постоянной времени T пользуются схемой Вагнера[6]) с аппаратурой по Гибе[7]) (фиг. 155). Здесь соединительные проводники подводятся бифилярно в заземленных металлических трубках к углам мостика $ABDG$, эти углы по возможности сближены между собой. Провода телефона во избежание индукционных влияний проведены перпендикулярно ко всем другим проводам. Емкостями C_3 и C_4 служат прецизионные воздушные конденсаторы.

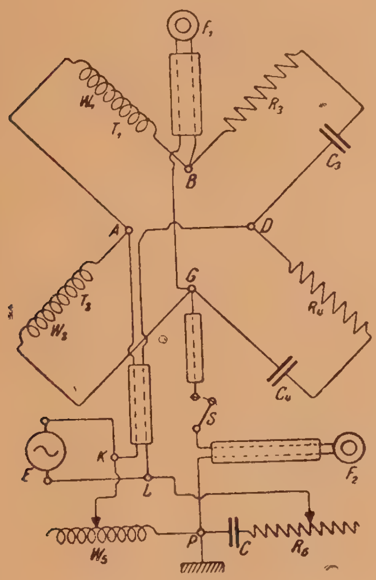
На упрощенной схеме (фиг. 156) W_1 — сопротивление, постоянную времени $T_1 = T_e - T_s$ которого нужно определить. Постоянная T_2 сопротивления W_2 известна. Сначала, при разомкнутом ключе S, приближенно регулируют ветви мостика так, чтобы звук в телефоне F_1, по возможности, исчез. Чтобы устранить влияние несовершенства изоляции и емкости ключа по отношению к земле, нужно точки B и G привести к потенциалу земли. Для этого замыкают S и регулируют во вспомогательной ветви KPL сопротивления W_5 и R_6, а также конденсатор C_6 так, чтобы исчез звук в телефоне F_2. Затем размыкают S и точно выравнивают мостик.

Получается соотношение[8]):

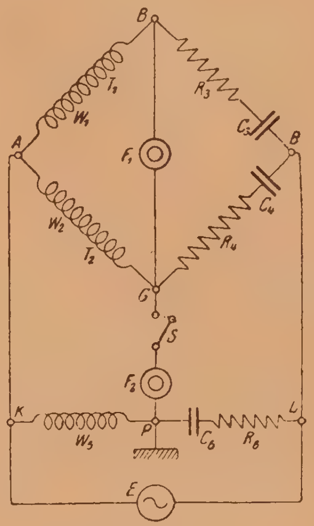
$$T_1 - T_2 = R_3 \cdot C_3 - R_4 \cdot C_4 .$$

С помощью этого включения можно также, по Вагнеру,[9]) определять малые емкости и диэлектрические утечки многожильных телефонных кабелей.

В качестве эталонных сопротивлений без поляризационной емкости до $\nu = 1000$ пер./сек. Шеринг и Шмидт [10]) применили жидкостное сопротивление из $^2/_3$ маннит-борной кислоты и KCl 0,04 *gr./литр.*; удельное сопротивление этой смеси $\rho = 1000\,\Omega/cm^3$ при $\vartheta = 18^0$C и температурном коэффициенте $\alpha \cong 0$.



Фиг. 155.



Фиг. 156.

Емкость и угол потерь больших сопротивлений можно также определить с помощью включения на резонанс токов [11]). Бэтман (Butmann) [12]) определяет эти величины с помощью конденсаторов, включенных мостиком по Вину (сравн. § 38). Ток для измерения в этом случае дает трансформатор высокого напряжения до 10.000 вольт.

Кэмпбелл [13]) определяет маленькие индукции и потери в конденсаторах путем сравнения с эталоном взаимоиндукции.

---

1) Compt. rend. 799 (1889).
2) Verh d. d. phys. Ges. 949 (1910).
3) El. (77) 629; ETZ. 509 (1917).
4) Bull. Bur. Stand. (3) (1913).
5) ETZ. 613 (1913).
6) ETZ. 1001 (1911); 614 (1913).
7) Ann. d. Ph. 941 (1907).
8) Phys. Z. 368 (1912).
9) ETZ. 635 (1912).
10) AfE. 423 (1912).
11) Phys. Z. (17) 114.
12) El. World. (71) 502; ETZ. 366 (1919).
13) El. (80) 666; ETZ. 389 (1919).

55. Определение диэлектрической постоянной.

Постоянную ϵ для жидких диэлектриков определяют следующим путем: сначала измеряют заряд Q_1 или емкость C_1 воздушного конденсатора; лучше всего если этот конденсатор построен из трех концентрических закрытых внизу цилиндров [1]) с небольшими промежутками между ними, а в этих промежутках помещены два другие цилиндра, образующие вторую обкладку конденсатора. Затем промежутки между цилиндрами наполняют испытуемым материалом и определяют при прежнем E количество электричества Q_2 или емкость C_2, тогда

$$Q_1 = C_1 \cdot E \qquad\qquad Q_2 = C_2 \cdot E = \epsilon \cdot Q_1,$$

из чего следует

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \epsilon = \frac{C_2}{C_1} .$$

Этот опыт повторяют при различных температудах ϑ и графически изображают зависимость величины ϵ от температуры ϑ, как $f\ (\epsilon, \vartheta)$—в большинстве случаев это будет прямая.

Для твердых тел употребляют пластинчатые конденсаторы, в узкие промежутки между которыми вводится пластина из испытуемого материала; при расстоянии между пластинами a, толщине диэлектрика d, диэлектрической постоянной воздуха [2]) $\epsilon_0 = 1{,}000576$ и пластины ϵ, для одного воздуха получим:

$$\frac{1}{C_0} = \frac{4\pi \cdot a}{\epsilon_0}$$

и при введенном диэлектрике

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{4\pi \cdot (a - d)}{\epsilon} +$$

$$+ \frac{4\pi \cdot d}{\epsilon} = \frac{4\pi}{\epsilon_0 \cdot \epsilon} \cdot [(a - d) \cdot \epsilon + d \cdot \epsilon_0] \cdot$$

Из обоих уравнений следует

$$\frac{C}{C_0} = \frac{a \cdot \epsilon}{(a - d) \cdot \epsilon + d \cdot \epsilon_0}$$

на основании чего можно вычислить ϵ, если измерены C и C_0. Вследствие влияния краев и частичной емкости по отношению к земле найденная величина будет меньше истинной. При этом имеется еще одно неудобство, именно трудность изготовления тонких пластин равномерной толщины и плотности[3]). Удобнее поэтому метод Грюнейзена (Grüneisen) и Гибе [5]), при котором пользуются трехпластинным конденсатором с заземленной внешней пластиной.

Другой метод состоит в том, что два металлические диска A и B устанавливают на одинаковом расстоянии по обоим сторонам третьего диска D, затем A и B приключают к двум квадрантам электрометра. Средний диск D соединяют со стрелкой электрометра и одним полюсом индуктора, другой полюс которого отводят к земле. После этого диск A, например, устанавливают на расстоянии a от D, так, чтобы электрометр не давал отклонения (емкость C_1). Затем помещают пластину из испытуемого материала, толщиной d между A и D. Вслед-

ствие увеличения емкости до C_2, придется, для уничтожения отклонения, сдвинуть диск A на длину b, так, чтобы $C_2 = C_1$. Тогда

$$\frac{1}{C_1} = \frac{4\pi \cdot a}{\epsilon_0}; \quad \int \frac{1}{C_2} = \frac{4\pi \cdot (a+b-d)}{\epsilon_0} + \frac{4\pi \cdot d}{\epsilon}$$

или

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \frac{d}{d-b}.$$

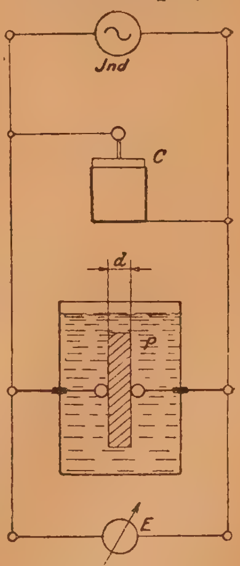
Больцман [5]) определяет ϵ по притяжению между заряженными металлическими шарами и шарами из испытуемого материала. При проводящем диэлектрике можно применять включение на резонанс токов [6]).

---

1) ETZ. 500 (1896). 2) ETZ. 656 (1914).
3) Quincke, Wied. Ann. (19) 714, 726.
4) Verh. d. d. phys. Ges. 921 (1912). 5) Pogg. Ann. (153) 525.
6) Phys. Z. (17) 114.

56. Испытание пробивной крепости изолирующих материалов.

Согласно фиг. 157 изолирующую пластину P помещают между двумя шарообразными электродами в сосуд, наполненный парафиновым маслом или керосином; электроды приключены к индуктору *Ind*, электрофорной машине или трансформатору. Конденсатор (лейденская банка) C служит для того, чтобы замедлить повышение напряжения; C за ним тогда удобнее следить по высоковольтному электрометру E. Напряжение E наблюдают в момент пробивания. Чтобы сравнить материалы различные по толщине d определяют удельное пробивное сопротивление $E_1 = \frac{E}{d}$ и изображают его графически как функцию от толщины $f(E_1, d)$. Так как пробивная крепость зависит от амплитудного значения E_{max}, то нужно определить таковое или с помощью предварительного измерения с искровым промежутком между иглами, или, что точнее, посредством измерительной установки, предложенной Шарпом (Sharpe) [1]). Эта последняя состоит из катодной лампы [2]) (кенотрон), в качестве выпрямителя, соединенной с конденсатором и статическим вольтметром.



Фиг. 157.

Для испытания фарфоровых изоляторов лучше всего пользоваться трансформатором. Следует отметить постройку испытательных трансформаторов на 1.000.000 вольт фирмами General Electric Co, Westinghouse El.—Ges. и др. [3]). Описание подобных установок и предохранительных приспособлений дали Мосциски (Moscicki) [5]), Вейкер [5]), Линкер [6]) и Гендрикс [7]).

Крейтон (Creighton) [8]) применяет в особом случае испытания высоковольтных изоляторов, осциллятор высокой частоты. Вся установка может легко передвигаться вдоль линии, что дает возможность испытать каждый изолятор сейчас же после установки током

высокой частоты. В большинстве случаев частоты такого рода появляются в линии при пробивании атмосферными разрядами вследствие волн перенапряжения.

Подробные опыты для исследования влияния на изолирующий материал давления, температуры и толщины произвел Кок (Kock)[9]. Для жидкостей он определял пробивную крепость с помощью цилиндрического искрового промежутка по Петерсону[10].

В противоположность изолирующим материалам, сопротивление которых заложено в самом материале (каучук, фарфор, смола, слюда, стекло), и изменяется в зависимости от приложенного напряжения лишь в незначительной степени, — волокнистые вещества (миканит, бумага, джут, хлопок), сопротивление которых зависит от содержания влаги, показывают уменьшение сопротивления R с увеличением напряжения E. Эвершед (Evershed)[11] дает для них

формулу $R = c\sqrt[n]{\frac{1}{E}}$, где n, как показывает опыт равно 2.

Далее обнаружено явление гистерезиса сопротивления, состоящее в отставании по времени изменения сопротивления от изменения напряжения, если производить испытание с возрастающим и затем убывающим напряжением.

Для быстрого испытания изолирующих материалов фирма Koch & Sterzel, Dresden изготовляет переносный испытательный трансформатор[12] для 500, 1.000 и 1.500 вольт.

Для испытания применяют также постоянный ток высокого напражения. Методы его получения дали Делон (Delon)[13], Лихтенштейн[14] и Шенкель (Schenkel)[15].

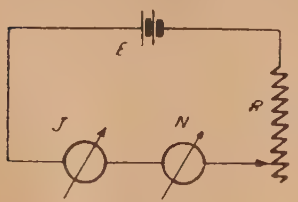
---

1) Gen. El. Rev. 4 (1919); ETZ. 354 (1919). 2) ETZ. 390 (1916).
3) El. World 607 (1912); ETZ. 186 (1913); 999 (1914); 316 (1923); 365 (1924).
4) ETZ. 527 (1904). 5) ETZ. 436, 460 (1911).
6) Dingl. polyt. Journ. (14) (1911).
7) Proc. AIEE. (30) 295 (1911); ETZ. 671 (1911) (рефер.).
8) Proc. AIEE. (34) 753, 2622; ETZ. 324 (1917).
9) ETZ. 85, 99 (1915). 10) Hochspannungstechnik 42.
11) Journ. Jnst. El. Eng. 51 (1913); ETZ. 887 (1914).
12) ETZ. 535 (1913). 13) ETZ. 1179 (1912). 14) ETZ. 1009 (1914).
15) ETZ. 333 (1919).

57. Градуирование и проверка ампер- и вольтметров.

I. Градуирование.

Если состояние изготовляемого прибора таково, что его можно градуировать, то его снабжают бумагой для шкалы, отмечают точки нуля и конечную и определяют длину стрелки, с тем, чтобы потом иметь возможность точно нанести дугу шкалы.



Фиг. 158.

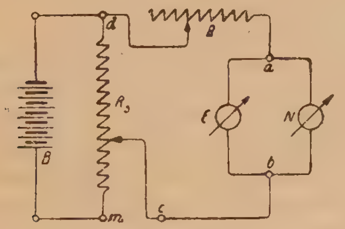
Для амперметра употребляют приведенное на фиг. 158 включение. При этом изменяют силу тока, отдаваемую источником тока E от нуля до высшего для градуируемого прибора значения J, с такими интервалами, что наименьшие значения можно определить с

достаточной точностью пропорциональным делением. При этом, однако, нет необходимости устанавливать все значения по эталонному прибору N. Каждое положение стрелки отмечают штрихом на бумаге шкалы, затем последнюю снимают, укрепляют на большом листе бумаги и проводят через отдельные отметки лучи из центра вращения до пересечения с дугой, у которой радиус в 3—4 раза больше радиуса дуги шкалы. На этой дуге, по возможности, часто чертят деления, затем переносят их на действительную шкалу. Таким образом, ошибки деления будут перенесены на шкалу уменьшенные в число раз, равное отношению радиусов.

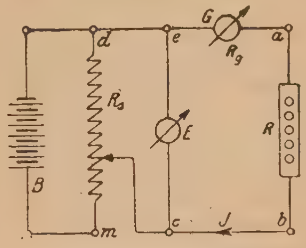
Если шкала уже снабжена равномерными делениями, то сравнивают показания нормального (эталонного) прибора с отклонениями, выраженными в делениях шкалы градуируемого прибора, и наносят показания J как ординаты, а показания N как абсциссы в прямоугольной системе координат, и по этим точкам строят градуировочную кривую в виде плавной кривой без скачков. При этом легко определяются ошибки наблюдения и их не трудно устранить. Затем кривую используют для вычерчивания шкалы.

У некоторых приборов (с мягким железом) нужно, вследствие гистерезиса, снять не только восходящую, но и нисходящую кривую и по средним значениям градуировать шкалу. Нужно также исследовать влияние полярности.

Если прибор—в о л ь т м е т р, то градуирование идет тем же порядком, только по схеме фиг. 159. С помощью делителя напряжения R_s ($>10\Omega$/вольт), включенного на батарею $Б$, устанавливают



Фиг. 159.



Фиг. 160.

приблизительно нужное напряжение между c d и затем точно регулируют его с помощью небольшого вспомогательного сопротивления R. Эта установка имеет то преимущество, по сравнению с включением последовательно большого сопротивления, что требуются только два относительно небольших сопротивления, при чем можно получить значительно большее число отдельных значений напряжения.

Для приборов, сопротивление которых изменяется при прохождении тока, вследствие большого температурного коэффициента меди, нужно либо иметь кривую температурных поправок, либо снабжать эти приборы компенсационной обмоткой (лучше всего медь и манганин, включенные последовательно).

При градуировании вольтметров на в ы с о к о е н а п р я ж е н и е с помощью искровых промежутков К л э р к с о н (Clarkson)[1]) рекомендует включить прибор под постоянное напряжение и медленно сокращать искровой промежуток, пока не последует перекрытие. Удобно при этом применять острые электроды (игольчатые искровые промежутки), так как для них зависимость пробивного расстояния от напряжения представляет собою почти прямую.

Гальванометры можно градуировать на малые силы тока следующим образом: так как отклонение s пропорционально силе тока J, особенно для приборов с подвижной катушкой, то имеет место отношение $J=c\cdot s$, где постоянная $c=\frac{J}{s}$ выражает собой чувствительность прибора, т.-е. ту силу тока, которая вызывает отклонение на одно деление шкалы. В этом случае градуировочная кривая $f\,(J,\,s)$ будет прямой. Для построения ее пользуются включением, изображенным на фиг. 160: с помощью делителя напряжения R_s получают между c e подходящее напряжение E и изменяют прецизионное сопротивление R — так, чтобы гальванометр давал различные отклонения s. Если R_g — заранее измеренное сопротивление гальванометра, то можно подсчитать

$$J=\frac{E}{R+R_g}\;.$$

Затем по полученным значениям J и s, выделив ошибочные точки, строят градуировочную кривую.

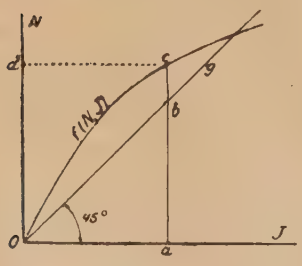
2. Проверка.

После частого употребления, главным образом технических измерительных приборов (ошибка до 1%), оказывается, что их показания отклоняются от истинных значений больше, чем на допустимую ошибку. Если при этом не хотят чертить новую шкалу, то строят, на основании проверки — поправочную кривую. Она представляет собой графическое изображение поправок или отрицательно взятую ошибку в зависимости от отсчитанной величины.

а) Амперметр. Сопротивление этих приборов относительно мало, поэтому и напряжение источника тока может быть невелико, т.-е. достаточно одного или двух аккумуляторов (от 2 до 4 вольт). Величина пластин аккумуляторов выбирается в зависимости от требуемой силы тока. Регулировочное сопротивление R должно быть выполнено так, чтобы выдерживать наибольшее значение силы тока при измерении.

Ток увеличивают ступенями от нуля и полученные при этом отчеты сводят в таблицу.

По этой таблице строят кривую $f\;(N,\;J)$, которая графически выражает зависимость между показаниями проверяемого прибора и истинными значениями силы тока N (фиг. 161).



Фиг. 161.

Разность $N-J=i$ и есть поправка, которую нужно прибавлять к показаниям J прибора, чтобы получить истинное значение силы тока N, согласно уравнению $J+i=N$.

Поправку i легко определить графически по градуировочной кривой. Если, при одинаковом масштабе для J и N, провести из начала координат прямую Og под углом 45° к их осям и для одного из отсчетов неточного прибора $J=Oa$ построить ординату ac, то $ac=N$ и есть соответствующее истинное значение. Если разложить ac на ab и bc, то получится равенство $bc=ac-ab$; а так как $ac=N$ и $ab=Oa=J$ и отсюда, как следствие, $bc=N-J=i$, то отрезки ординат bc и выражают собой поправку i.

Если мы изобразим графически зависимость отрезков $bc = i$, лежащих между прямой Og и найденной кривой $f(N,J)$, от J, то получим кривую поправок $f(i,J)$. Если же кривая поправок $f(i,J)$ выражена прямой, наклоненной к оси абсцисс под углом α, то поправки p можно выразить в процентах от отсчитанной величины J в виде

$$i = \frac{p}{100} \cdot J = J \cdot tg\,\alpha \cdot$$

Проще всего найти p построив ординату, соответствующую абсциссе длиной в 100 *mm*; длина ординаты даст тогда непосредственно значение p.

Для приборов переменного тока число периодов при испытании должно быть одинаково с тем, для которого прибор построен. Особенно важно это для приборов, показания которых зависят от числа периодов. К ним принадлежат электромагнитные (с мягким железом) и индукционные приборы и амперметры, работающие по электродинамическому принципу. Форма кривой тока испытания должна лишь незначительно отличаться от формы кривой рабочего тока.

Для низких напряжений, при соответственно большой силе тока, применяют автотрансформаторы с одной обмоткой и рядом ответвлений, или трансформаторы с разделенными первичной и вторичной обмотками.

b) Вольтметр. Включение делается по схеме фиг. 159. Измерение проводится так же как было описано в а). Таким же образом кривую поправок $f(e,E)$, определяют по уравнению $e = N - E$.

---

[1]) El. World. 1307 (1912); ETZ. 535 (1913).

---

58. Испытание уаттметров и счетчиков электрической работы.

Эти измерительные приборы основаны на одном и том же принципе, а именно: измерения соответствующей величины производятся с помощью катушки тока H и катушки напряжения S, поэтому мы оба типа разберем на примере включения счетчика электрической энергии.

В тех случаях, когда не требуется большой точности, испытание можно произвести путем сравнения с эталонным счетчиком или уаттметром. Лучше, однако, определять измеряемую величину $P = E \cdot J$ или $A = E \cdot J \cdot t = P \cdot t$ по измеренным отдельно—напряжению, силе тока и мощности, а также времени. При массовом же испытании однотипных приборов применяют так называемый контрольный счетчик [1]); его строят и для больших сил тока [2]).

Программа испытания счетчика состоит при этом из следующих пунктов [3]):

а) Холостой ход. К источнику тока включена одна катушка напряжения. Требуется определить влияние различных напряжений (до 120%) и величину мощности при холостом ходе (возможном при сотрясениях).

b) Чувствительность. При нормальном напряжении нужно определить, при какой минимальной силе тока, измеренной в процентах от нормальной, счетчик трогается с места.

c) Постоянная. Требуется исследовать изменение постоянной по отношению к величине, обозначенной на приборе, при различных нагрузочных токах (например 5, 10, 20, 50, 100, 120% от J). Для счетчиков переменного тока нужно, кроме того, исследовать постоянную при нормальной силе тока J на отставание и опережение, в зависимости от различных коэффициентов мощности $\cos\varphi$ (0,2; 0,5; 0,8; 1). При нормальном напряжении (и числе периодов для переменного тока) ошибка постоянной при изменении силы тока в пределах от нормального $J_{\text{нор.}}$ и до $\frac{1}{20}\cdot J_{\text{нор.}}$ не должна превышать [4]:

$$+F=\left(3+\frac{3}{10}\cdot\frac{A_{\text{нор.}}}{A}\right)$$

или соответственно

$$3+0{,}2.\frac{A_{\text{нор.}}}{A}+\left(1+0{,}2.\frac{J_{\text{нор.}}}{J}\right)\cdot tg\,\varphi.$$

Здесь $J_{\text{нор.}}$ и соответственно $A_{\text{нор.}}$—нормальная сила тока и нагрузка, для которых предназначается счетчик; J и соответственно A—та сила тока и нагрузка, для которой устанавливается предельное значение F в процентах от этой же нагрузки; φ—угол сдвига фаз.

Кроме того нужно выяснить, удовлетворяет ли данная конструкция требованиям закона и принятым нормам. В СССР, например, правилам Главной Палаты Мер и Весов.

d) Перегрузка. Поле, вызываемое сильными токами в главных катушках, не должно влиять на постоянные стальные магниты, демпфирующие счетчик посредством токов Фуко. Так, если замкнуть накоротко нагрузочную цепь, то постоянная счетчика не должна после этого измениться.

При испытании катушка напряжения должна быть включена так, чтобы одновременно не измерялась потребляемая ею мощность. Целесообразно для испытания пользоваться двумя отдельными источниками тока, а именно: одним низкого напряжения на требуемую силу тока для катушки тока и другим на малую силу тока, но с напряжением, требуемым для тонкой катушки (катушки напряжения).

При переменном токе катушки включают к соответствующим трансформаторам, а в цепь напряжения вводят т. наз. регулятор фаз [5]. Это трансформатор с коэффициентом трансформации $u=1$, выполненный по типу трехфазного мотора; его вторичную обмотку (ротор) с помощью винтовой передачи можно поворачивать по отношению к первичной (см. также фиг. 74).

Чтобы иметь возможность проверить счетчик во время работы, его снабжают т. наз. контрольными клеммами

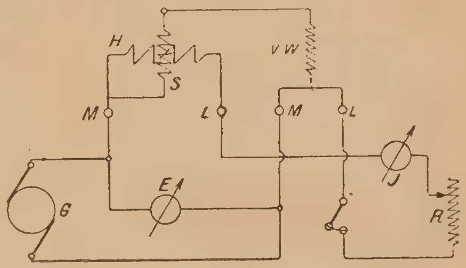
В зависимости от конструкции счетчика по принципу маятника или мотора можно различать следующие методы испытания:

1. Приборы постоянного тока.

a) Моторный счетчик. Для малых счетчиков при испытании обычно пользуются полным напряжением E и специальным нагрузочным сопротивлением R (фиг. 162). Генератор приключается к клеммам M, нагрузка к L. Для испытания постоянной

отсчитывают число оборотов u, которое делает ось прибора в t секунд, отмечают также напряжение E и силу тока J; их все время опыта поддерживают постоянными. Вообще, для отсчета достаточно 3-х минут, и только при малых нагрузках нужно больше времени (при холостом ходе требуется 1 час). Время t определяют с помощью секундомера или двойного самопишущего счетчика времени. Для точной автоматической записи скорости вращения Гевеке и Круковский (Krukowski) [6]) предложили особый способ.

Счетный механизм связан с осью якоря и имеет неизменное передаточное число. Между числом оборотов и соответствующим количеством единиц электрической энергии имеется некоторое отношение, которое называют постоянной c счетчика. Согласно уравнения $c = \frac{u}{A_{сч.}}$ ее определяют как число оборотов, приходящееся на единицу работы (килоуаттчас).



Фиг. 162.

Если при u оборотах в t секунд счетчик показал работу

$$A_{сч} = \frac{1}{c} \cdot u \text{ kWh}$$

измерение же дало

$$A = \frac{E \cdot J \cdot t}{3600 \cdot 1000} \text{ kWh}$$

где E и J постоянные или средние величины отсчетов. Если счетчик показывает правильно, то $A = A_{сч}$ или

$$\frac{E \cdot J \cdot t}{3{,}6 \cdot 10^6 \cdot u} \cdot c = 1 .$$

Если же правая сторона равна не единице, а m, то ошибка будет $1 - m$. Поправка—это отрицательное значение ошибки, выраженное в процентах, она будет $a = (m - 1) \cdot 100$.

Если истинная постоянная $c_{ист.}$, то

$$\frac{E \cdot J \cdot t}{3{,}6 \cdot 10^6 \cdot u} \cdot c_{ист.} = 1;$$

в то же время для постоянной c испытуемого прибора уравнение будет

$$\frac{E \cdot J \cdot t}{3{,}6 \cdot 10^6 \cdot u} \cdot c = m .$$

Из обоих уравнений следует $c_{ист.} = \frac{c}{m}$. Так как, кроме того, $a = \frac{A - A_{сч.}}{A_{сч.}} \cdot 100$, и $A = \frac{1}{c_{ист.}} \cdot u$, показание счетчика $A_{сч.} = \frac{1}{c} \cdot u$, то получаем

$$a = \frac{\frac{u}{c_{ист.}} - \frac{u}{c}}{\frac{u}{c}} \cdot 100 = \frac{c - c_{ист.}}{c_{ист.}} \cdot 100 .$$

Если $c_{\text{ист.}} > c$, то счетчик показывает слишком много и поправка отрицательна. Изобразив графически зависимость поправки, выраженной в процентах a от нагрузочного тока J, получим кривую поправок $f\ (a, J)$. Выгодно при этом если кривая дает положительные и отрицательные значения, а не лежит по одну сторону от оси абсцисс. Средняя ошибка вообще не должна превышать $\pm 1\%$.

Симонс [7]) предлагает производить исследование при различных нагрузочных токах и одинаковом числе оборотов катушки напряжения, а также дает новый способ построения поправочной кривой.

Счетчики для больших сил тока испытывают, разделив цепи тока и напряжения, т.-е. с искусственной нагрузкой.

b) Маятниковый счетчик. Непосредственное наблюдение показаний возможно только при больших силах тока. При этом для приборов нового типа нужно выждать два периода переключения, т.-е. испытывать в течение 20 минут. Если же хотят сократить время испытания, особенно при малой нагрузке, то поступают следующим образом: у счетчиков старого типа предварительно останавливают один маятник и определяют, скольким качанием s_1 другого маятника отвечает показание $A_{\text{сч.}}$ счетного механизма; тогда постоянная $c = \frac{s_1}{A_{\text{сч.}}}$. Если включить ток J на время t секунд, то между качаниями двух маятников окажется разность в числе s, которую можно определить по совпадениям, т.-е. положениям, при которых оба маятника вместе дают один звук удара. Между двумя совпадениями тогда лежит одна разность качаний. Поправка определится как и выше из формулы

$$a = (m - 1) \cdot 100,$$

где

$$m = \frac{E \cdot J \cdot t \cdot s_1}{3{,}6 \cdot 10^6 \cdot s \cdot A_{\text{сч.}}}.$$

У новых счетчиков правый маятник длиннее левого и делает, чтобы вызвать поворот механизма на одно деление $s_{\text{пр.}} = \frac{222{,}5}{9}$ качаний, против $s_{\text{л.}} = \frac{227{,}5}{9}$ качаний левого или целое простое число от них. Пусть, далее, при ненагруженной главной катушке (тока) правый маятник делает $p_{\text{пр.}}$ и левый $p_{\text{л}}$ качаний в 1 секунду. Если при прохождении тока отсчитано $p'_{\text{пр.}}$ и $p'_{\text{л}}$ качаний в 1 сек., при чем пусть $p'_{\text{л}} > p_{\text{л}}$ (ускорение) и $p'_{\text{пр.}} < p_{\text{пр.}}$ (замедление), то левый маятник повернул счетный механизм в 1 секунду на $\frac{p'_{\text{л}}}{s_{\text{л}}}$, правый на $-\frac{p'_{\text{пр.}}}{s_{\text{пр.}}}$, так что оба вместе вызвали $\frac{p'_{\text{л}}}{s_{\text{л}}} - \frac{p'_{\text{пр.}}}{s_{\text{пр.}}}$ поворотов счетного механизма в секунду. После переключения пусть отсчитано $p''_{\text{л}}$ и $p''_{\text{пр.}}$ качаний в 1 сек., при чем $p''_{\text{л}} < p_{\text{л}}$ и $p''_{\text{пр.}} > p_{\text{пр.}}$. Кроме того, переключено направление вращения механизма. Тогда он сделает $\frac{p''_{\text{пр.}}}{s_{\text{пр.}}} - \frac{p''_{\text{л}}}{s_{\text{л.}}}$ оборотов в 1 сек. Если T промежуток времени между

переключениями, то механизм за время 2-х переключений, следовательно в 2 T секунд, сделает

$$T\cdot\left(\frac{p'_{л}}{s_{л}}-\frac{p'_{пр.}}{s_{пр.}}+\frac{p''_{пр.}}{s_{пр.}}-\frac{p''_{л}}{s_{л}}\right)$$

поворотов. Если постоянная счетчика $c=\frac{u}{A_{сч.}}$ оборот./kWh, то после 2-х переключений он покажет работу

$$A_{сч.}=\frac{u}{c}=\frac{T}{c}\cdot\left(\frac{p'_{л}}{s_{л}}-\frac{p'_{пр.}}{s_{пр.}}+\frac{p''_{пр.}}{s_{пр}}-\frac{p''_{л}}{s_{л}}\right)\text{kWh}$$

Измерения же дали:

$$A=\frac{E\cdot J\cdot 2T}{3{,}6\cdot 10^{6}}\,\text{kWh}$$

Из уравнения для точного хода $A=A_{сч.}$ следует:

$$\text{I.}\qquad \frac{E\cdot J\cdot 2.c}{3{,}6\cdot 10^{6}\left(\frac{p'_{л}}{s_{л}}-\frac{p'_{пр.}}{s_{пр.}}+\frac{p''_{пр.}}{s_{пр.}}-\frac{p''_{л}}{s_{л}}\right)}=1$$

Так как трудно считать быстрые качания, то легче отмечать время t между двумя совпадениями качаний. Именно в период первого переключения, при t' секунд между двумя совпадениями, оба маятника сделали

$$q'_{л}=p'_{л}\cdot t' \text{ и } q'_{пр.}=p'_{пр.}\cdot t' \text{ качаний;}$$

а так как разность их качаний равна одному качанию, то получаем

$$1=q'_{л}-q'_{пр.}=t'\cdot(p_{л}-p'_{пр.})$$

или

$$p'_{л}-p'_{пр.}=\frac{1}{t'}\,.$$

Таким же путем найдем

$$p''_{пр.}-p''_{л}=\frac{1}{t''}\,.$$

Подставив в уравнение $p'_{пр.}=p'_{л}-\frac{1}{t'}$ и $p''_{пр.}=p''_{л}-\frac{1}{t''}$, после преобразования получим

$$\text{II.}\qquad \frac{E\cdot J\cdot 2\cdot c\cdot s_{пр.}}{3{,}6\cdot 10^{6}.\left[\frac{1}{t'}+\frac{1}{t''}+(p'_{л}-p''_{л})\cdot\left(\frac{s_{пр.}}{s_{л}}-1\right)\right]}=1\cdot$$

Приняв, согласно А р о н у,

$$p'_{л}=p_{л}\cdot\left(1+\frac{k}{2}\cdot P-k'\,P^{2}\right)$$

$$p''_{л}=p_{л}\cdot\left(1-\frac{k}{2}\cdot P-k'\cdot P^{2}\right),$$

где $P=E\cdot J$ обозначает мощность, находим

$$p'_{л}-p''_{л}=p_{л}\cdot k\cdot P=K\cdot P$$

Кроме того, имеем

$$\frac{s_{пр.}}{s_{л}}=\frac{89}{91} \text{ и } \frac{s_{пр.}}{s_{л}}-1=-\frac{2}{91}\,.$$

Подставив эти значения, получим для случая ошибочных показаний счетчика

$$\frac{E \cdot J \cdot s_{\text{пр.}} \cdot c}{3{,}6 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{1}{t'} + \frac{1}{t''} - \frac{2}{91} \cdot K \cdot P\right)} = m.$$

Истинная же постоянная будет, как и раньше, $c_{\text{ист.}} = \frac{c}{m}$ и поправка

$$a = (m-1) \cdot 100\ \%.$$

Отдельные величины, входящие в уравнение, определяются следующим образом:

E и J отсчитываются по вольтметру и амперметру, чем определяется и P. $s_{\text{пр.}}$ измеряется предварительно при ненагруженном счетчике и при остановленном левом маятнике. Если, например, оказалось, что 50 качаний правого маятника вызывают один поворот стрелки, то

$$s_{\text{пр.}} = x \cdot \frac{222{,}5}{9} = 50$$

Так как x должно быть целым числом, то мы получим

$$x = \frac{9.50}{222{,}5} = \backsim 2, \text{ т.-е. } s_{\text{пр.}} = \frac{445}{9}.$$

c определяется по передаточному числу счетного механизма

Чтобы определить t' и t'' отсчитывают за время каждого периода переключения n совпадений за t секунд, тогда t' и, соответственно, t'' равно частному $\frac{t}{n}$. При этом может случиться, что t'' будет отрицательно, так как правый, более длинный маятник, несмотря на ускорение, все же может качаться тише замедленного левого маятника. Чтобы определить постоянную $K = \frac{p'_{\text{л}} - p''_{\text{л}}}{E \cdot J}$ находят $p'_{\text{л}}$ и $p''_{\text{л}}$, для чего определяют при нагрузке для каждого периода переключения число качаний левого маятника $z_{\text{л}}$ за некоторое определенное время t (сек.) и делят оба значения одно на другое

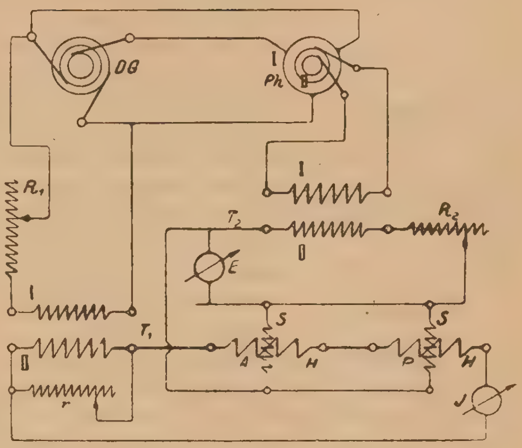
$$\left(p_{\text{л}} = \frac{z_{\text{л}}}{t}\right).$$

2. Приборы для однофазного переменного тока.

Кроме вольт- и амперметра в этом случае нужен еще уаттметр для определения мощности и сдвига фаз. В остальном измерение идет так же, как было описано в отделе 1. При больших силах тока разделяют цепи тока и напряжения (фиг. 163).

Лучше всего для этого измерения пользоваться трехфазным генератором $D\,G$, который одновременно может служить для питания регулятора фаз Ph. Ко вторичной обмотке II последнего, поворачи-

вающейся с помощью винтового сцепления, приключают трансформатор T_2, ко вторичной катушке II которого включают цепи напряжения S счетчика A и уаттметра P. При регулировании сдвига фаз напряжение E будет изменяться, поэтому для точной окончательной регулировки его пользуются реостатом R_2. Катушки тока H приборов включены во вторичную цепь II трансформатора T_1. При этом, сопротивление R_1 служит для грубой и r для тонкой регулировки силы тока J. При такой искусственной нагрузке следует стремиться к одинаковой форме кривых у трансформаторов. Иначе может случиться, как это показал Орлих [8]), что, при совпадении фаз E и J, все же окажется, что $P < E \cdot J$.



Фиг. 163.

3. Приборы трехфазного переменного тока.

При этом измерении уаттметры включают, по вышеописанной (стр. 93) схеме Арона, в комбинации с трехфазными трансформаторами. В качестве источника тока удобен двойной трехфазный генератор [9]) (сравн. также стр. 76). Для определения правильности включения отдельных фаз можно пользоваться, по указаниям Орлиха [10]), вспомогательной диаграммой линейных и фазовых сил тока и напряжений.

---

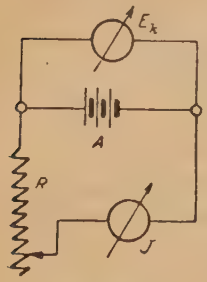
1) ZfI 154 (1908).
2) El. World. 1309 (1912); ETZ. 1324 (1913).
3) ETZ. 1035 (1900); 94 (1901).
4) ETZ. 601 (1914).
5) ETZ. 774 (1902).
6) ETZ. 356 (1918).
7) ETZ. 260 (1916).
8) ETZ. 543 (1902).
9) ETZ. 502 (1907).
10) ETZ. 97 (1901).

59. Испытание аккумуляторов.

Для этих испытаний имеется ряд предписаний, из которых мы можем рассмотреть только важнейшие и наиболее употребительные в практике. К их числу принадлежат определение коэффициента полезного действия, снятие кривых заряда и разряда, измерение плотности кислоты, исследование потенциала пластин и т. д.

Аккумулятор (свинцовый) наполняют разведенной серной кислотой с удельным весом 1,18 и полностью заряжают до тех пор, пока не появятся большие пузырьки газа и эл. дв. сила не перестанет повышаться. Обычно один элемент в этом случае обладает эл. дв. силой $E = 2{,}7$ вольта. Теперь соберем приводимую

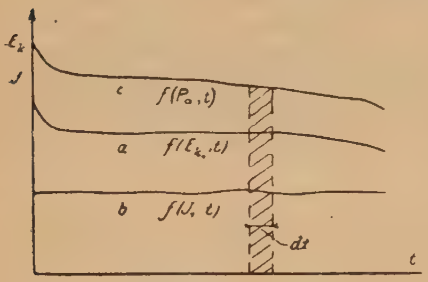
схему (фиг. 164) и отрегулируем сопротивление R так, чтобы аккумулятор давал нормальную силу разрядного тока J_1, при которой нам нужно произвести испытание. Затем будем наблюдать за напряжением E_k, на клеммах аккумулятора, поддерживая постоянной силу тока J_1. Перед началом опыта следует устранить перенапряжение, вызванное неравномерной концентрацией; оно исчезнет и само по себе через несколько часов, но чтобы быстро устранить его, нужно нагрузить аккумулятор нормальной силой тока приблизительно на одну минуту. Эл. дв. сила упадет тогда приблизительно до 2,1 вольта и может считаться разрядным напряжением, если она не будет падать дальше при отсутствии нагрузки.



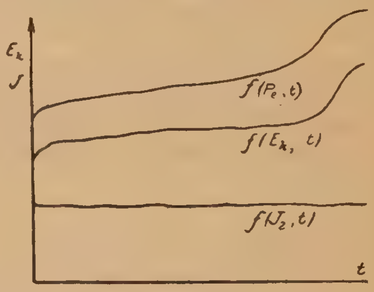
Фиг. 164.

Выразив графически зависимость E_{k1} от времени разряда t, то получим кривую разряда $f\ (E_{k1},t)$ при $J_1 = \text{const}$ (фиг. 165). Если ток J_1 не оставался постоянным, а колебался, то отмечают значения J_1, как функции от t и вычерчивают кривую тока $f\ (J_1, t)$. Определив величину произведения E_{k1} на J_1 в различные моменты измерения получим изменение отданной, при разряде, мощности $f\ (P_a\ ,t)$. Разряд нужно считать оконченным, когда напряжение одного элемента упало до 1,83 вольта.

Затем будем заряжать аккумулятор нормальной силой тока J_2 и так же, как при первом измерении, на основании зарядного напря-



Фиг. 165.



Фиг. 166.

жения E_{k2} и времени t, построим кривую заряда $f\,(E_{k2},t)$ и кривую $f\,(J_2,t)$ (фиг. 166). Произведение обоих ординат даст нам

$$E_{k2} \cdot J_2 = P_e$$

полученную мощность и отсюда $f\ (P_e\ ,t)$. Заряд можно считать оконченным, когда эл. дв. сила (не напряжение на клеммах!) достигнет 2,7 вольта. (Для отсчета прерывают ток J_2 на несколько секунд).

Используем эти кривые следующим образом: если время t измерено в часах, то узкая площадка $f\ (J_1,t)$ величиной fi_1, соответствующая маленькому промежутку времени dt, выражает собою маленькое количество электричества

$$c_{i_1} \cdot f_{i_1} = J_1 \cdot dt = dQ \text{ амп. часов.}$$

Масштаб $c_{i_1} = \dfrac{dQ}{fi_1}$ определится как количество электричества, которое соответствует единице площади (1 *cm.*²). Если, например, принято 1 *cm.* ординаты 2 амп. и 10 *cm.* абсциссы 1 час, то, соответственно, $1.10 = 10\ cm^2 = 2\ \text{Ah}$, откуда $c_{i_1} = \dfrac{2}{10} \cdot \dfrac{\text{Ah}}{cm^2}$.

Для всего времени разряда t все количество электричества есть сумма отдельных элементарных количеств, так что

$$Q_1 = \int_0^{t_1} dQ = c_{i_1} \cdot \int_0^{t_1} f_{i_1} = c_{i_1} \cdot \Big[F_{i_1} \Big]_0^{t_1}.$$

Таким образом площадь $\Big[F_{i_1} \Big]_0^{t_1}$ в границах O и t_1 будет мерою количества электричества Q_1, отданного аккумулятором при разряде или емкости в амперчасах Ah.

Подобным же образом найдем полученное количество электричества

$$c_{i_2} \cdot \Big[F_{i_2} \Big]_0^{t_2} = Q_2.$$

Отношение

$$\eta_э = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{c_{i_1} \cdot \Big[F_{i_1} \Big]_0^{t_1}}{c_{i_2} \cdot \Big[F_{i_2} \Big]_0^{t_2}}$$

называют **коэффициентом электрической отдачи** аккумулятора. Он лежит между 0,94 и 0,97.

Если масштабы обоих кривых взяты одинаковые, то $c_{i_1} = c_{i_2}$ и $\eta_э = \frac{F_{i_1}}{F_{i_2}}$. Тогда определяют площадь обоих полосок до ординаты t_1 и соответственно t_2 с помощью планиметра, интегратора или построения интегральной кривой (сравн. фиг. 191) и берут частное. Количество электричества можно также определить непосредственно с помощью счетчика амперчасов, но метод подсчета точнее, так как вольтметр и амперметр дают меньшие ошибки, чем счетчик.

Далее, для узкой полоски f_{e_1} кривой напряжения

$$c_{e_1} \cdot f_{e_1} = E_{k_1} \cdot dt.$$

Если $J_1 = \text{const}$ или постоянная средняя величина из отдельных отсчетов, то посредством умножения и интегрирования получим:

$$c_{e_1} \cdot J_1 \cdot \int_0^{t_1} f_{e_1} = \int_0^{t_1} E_{k_1} \cdot J_1 \cdot dt = \int_0^{t_1} P_a \cdot dt = A_1 \text{ уаттчасов,}$$

или

$$c_{e_1} \cdot J_1 \cdot \Big[F_{e_1} \Big]_0^{t_1} = A_1 \text{ Wh.}$$

Таким же образом из кривой заряда

$$c_{e_2} \cdot J_2 \cdot \Big[F_{e_2} \Big]_0^{t_2} = A_2 \text{ Wh.}$$

Отношение

$$\eta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{c_{e_1}}{c_{e_2}} \cdot \frac{F_{e_1}}{F_{e_2}} \cdot \frac{J_1}{J_2}$$

представляет собой, важнейший для практики **коэффициент полезного действия** (для свинцовых аккумуляторов 0,75 ÷ 0,85). При $c_{e_1} = c_{e_2}$ можно определить η посредством измерения площадей или, проще, посредством построения интегральной кривой.

Если нужно принять во внимание колебания силы тока, то можно определять работу A при заряде и разряде непосредственно по площадкам, ограниченным кривыми мощностей $f\ (P, t)$.

Наконец, можно избежать отсчета и построения кривых по точкам, применив записывающие приборы. О степени заряженности аккумулятора приближенно можно судить по плотности серной кислоты. При этом нужно часто повторять измерения плотности. Заводы указывают границы плотности в прилагаемых к аккумуляторам наставлениях. Вообще же изменение ее достигает приблизительно 3%. Степень заряженности отдельных пластин определяют путем измерения разности потенциалов между данной пластиной и нейтральным вспомогательным электродом. В качестве последнего удобно взять кусок хорошо заряженной аккумуляторной пластины и поместить его в сосуд. Цинковые и кадмиевые пластины дают, вследствие еще невыясненной концентрации ионов, несколько колеблющиеся значения.

При большом числе элементов, соединенных в батарею, нужно произвести исследование нескольких отдельных элементов батареи порознь. В особенности это важно в том случае, когда вся батарея дает значения, отклоняющиеся от нормальных. Напряжение машины, служащей для заряда, должно повышаться почти на 40% по отношению к начальному напряжению батареи. При больших силах тока в качестве нагрузки берут жидкостные сопротивления с раствором соды или поташа. Для испытания на саморазряд количество электричества определяют сейчас же после зарядки, затем вновь заряжают аккумулятор и оставляют стоять без всякой нагрузки приблизительно неделю; после чего опять определяют количество электричества. Сопротивление аккумулятора определяют с помощью одного из вышеописанных методов, в которых устранено влияние поляризации.

---

60. Исследование термоэлектрической батареи.

Чаще всего в практике встречается термобатарея Pintsch'а, работающая на светильном газе. Для испытания включают газометр, открывают газовый кран и зажигают газ. Затем, переждав немного, чтобы установилось стационарное состояние, снимают внешнюю характеристику $f(E_k, J)$, т.-е. зависимость напряжения на клеммах E_k от тока J или, соответственно, от внешнего сопротивления R, эту зависимость изображают графически. Затем вычисляют отданную мощность $P_{отд.} = E_k \cdot J$ и изображают ее также в виде $f(P_{отд.}, J)$. Эта кривая показывает, при какой силе тока мы получаем наибольшую мощность. Далее из $\frac{E - E_k}{J} = R_{внут.}$ находим внутреннее сопротивление $R_{внут.}$ Здесь E обозначает эл. дв. силу или напряжение на клеммах при $J = O$.

Чтобы определить термический коэффициент полезного действия $\eta_{терм.}$ измеряем, при постоянном внешнем сопротивлении R и токе J,—напряжение на клеммах E_k, потребление газа V в литрах, а также время отдачи энергии t в секундах.

При теплопроизводительности газа $H \frac{\text{калорий}}{\text{литр}}$ полученная работа будет

$$A_{п.} = 4{,}190 \cdot V \cdot H \text{ джоулей;}$$

отданная же электрическая работа

$$A = E_к \cdot J \cdot t \text{ джоулей},$$

таким образом коэффициент полезного действия

$$\eta_{термич.} = \frac{E_к \cdot J \cdot t}{4,190 \cdot V \cdot H} = 0,239 \cdot \frac{E_к \cdot J \cdot t}{V \cdot H}.$$

В практике, однако, часто важнее ответить на вопрос, сколько копеек K стоит 1 kWh электрической энергии. Уравнение в этом случае будет иметь следующий вид

$$K = \frac{k \cdot V \cdot 3{,}6 \cdot 10^3}{E_к \cdot J \cdot t} \text{ коп/kWh},$$

где k—цена в копейках одного кубического метра газа и V измерено в литрах.

---

61. Исследование электрического кипятильника.

Сначала нужно узнать, сколько стоит электрическая энергия, потребляемая при кипячении посредством электричества, или, чтобы иметь возможность сравнить различные аппараты, сколько стоит нагреть один литр воды от 0° до 100°C. Для этого производят опыт кипячения. С другой стороны нужно определить коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{A}{A_п},$$

который определяется, как отношение работы A, пошедшей на образование пара, к полученной прибором электрической работе $A_п$. Для этого служит опыт выпаривания.

a) Опыт кипячения. Кипятильник, налитый G граммами воды, включают вместе с амперметром J и дополнительным сопротивлением R к источнику тока. С помощью реостата поддерживают постоянным напряжение E на клеммах кипятильника. При включении тока в момент t_1 температура воды была ϑ_1°C. Затем наблюдают (сначала сильно падающую) силу тока в зависимости от времени t. К моменту t_2 температура воды поднялась до ϑ_2° C (около 95÷97°). Если теперь определить из кривой тока $f(J,t)$ среднее значение

$$J_{сред.} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} J \cdot dt,$$

то кипятильник потребил электрическую работу

$$A = \frac{E \cdot J_{сред.} \cdot (t_2 - t_1)}{1000 \cdot 3600} \text{ kWh},$$

если t измерено в секундах. (Можно также

$$Q = J_{сред.} \cdot (t_2 - t_1) = \int_{t_1}^{t_2} J \cdot dt$$

определить из интегральной кривой). Таким образом получено $G \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$ калорий.

Если цена электричества K коп/kWh, то нагреть аппаратом 1 литр воды на 100^0 С, т.-е. получить 10^5 калорий стоит

$$K = \frac{E \cdot J_{\text{сред.}} \cdot (t_2 - t_1) \cdot K}{36 \cdot G \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)} \text{ копеек.}$$

b) Опыт выпаривания. Кипятильник ставят на весы и нагревают воду до кипения. При постоянном напряжении E вольт и силе тока J ампер общий вес определяют дважды: сначала в момент t_1 вес G_1 и затем через несколько времени в момент t_2 вес G_2. Тогда за время $t = t_2 - t_1$ секунд испарилось $G = G_1 - G_2$ грамм воды. Скрытая теплота парообразования воды 535,9 калор. при 100^0 С. Следовательно, на образование пара отдано $A = 535{,}9 \cdot G$ калорий.

Получено же было

$$A_n = E \cdot J \cdot t \text{ дж.} = 0{,}239 \cdot E \cdot J \cdot t \text{ калорий.}$$

Отсюда коэффициент полезного действия

$$\frac{A}{A_n} = \eta = 2250 \cdot \frac{G_1 - G_2}{E \cdot J \cdot (t_2 - t_1)}.$$

ОТДЕЛ II.

Магнитные измерения.

Для исследования магнитных свойств железа могут служить методы, основанные на следующих явлениях:

1. Взаимодействие двух магнитных полей (магнитометр Гаусса).
2. Индукция (баллистический метод, ярмо).
3. Магнитное отрывание (пермеаметр, весы).
4. Изменение электрического сопротивления (висмута) магнитным полем (явление Халля).
5. Взаимодействие между проводником с током и магнитным полем (аппарат Кэпселя (Köpsel), курвограф Юинга (Ewing);
6. Вращение плоскости поляризации луча света магнитным полем (магнитооптический метод Керра (Kerr) и Дю Буа) [1]).

Однако, из этих методов будут рассмотрены только наиболее употребительные в практике, от 1-го до 5-го, которые вообще называют магнитостатическими. Далее, в электрических машинах, трансформаторах и аппаратах, вследствие вращающегося и переменного намагничения, в особенности при высоком числе периодов, железо находится в иных условиях и появляются иные отношения, под влиянием токов Фуко. Кроме того, вследствие размагничивающего действия, особенно сильного в середине сечения, индукция распределяется неравномерно (так назыв. магнитное экранирование) [2]). По этой причине в ряде случаев нужны аппараты, позволяющие измерить, т. наз. динамическое намагничение, и в то же время определить мощность, потребляемую на гистерезис и токи Фуко. Вейсхар (Weiszhaar) [3]) рекомендует для графического изображения кривых намагничивания и потерь на гистерезис логарифмическую бумагу фирмы Schleicher & Schüll, Düren.

---

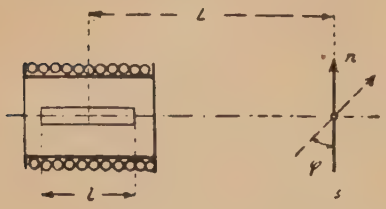
[1]) Ewing, Magnet. Ind. im Eisen 151.
[2]) ETZ. 669,688 (1898).
[3]) ETZ. 400,598 (1910).

---

1. Магнитометрический метод.

Этим способом можно исследовать только намагничиваемые стержни или по меньшей мере формы, обладающие свободными полюсами, кольцовая форма поэтому исключается. Инструментом для исследования нам служит магнитометр, т.-е. маленькая магнитная стрелка, подвешенная на тонкой коконовой нити, свободно колеблющаяся под воздействием земного поля.

Угол отклонения ее можно наблюдать при помощи зеркала и зрительной трубы или об'ективно, по отраженному лучу света. Испытуемый стержень длиною l вкладывается в длинную катушку и устанавливается на расстоянии L от магнитометра так, чтобы стержень находился в одной горизонтальной плоскости со стрелкой ns (фиг. 167) и перпендикулярно к направлению меридиана. Если теперь пропустить некоторый ток через катушку, то стержень намагнитится и отклонит стрелку на угол φ.



Фиг. 167.

Чтобы устранить влияние расстояния между полюсами [1]) делаем второе измерение при расстоянии L_1, для которого получаем $\measuredangle\ \varphi_1$. Далее (по Гауссу) имеем отношение

$$\frac{M}{B_{\text{зем.}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{L^5 \cdot tg\varphi - L_1{}^5 \cdot tg\varphi_1}{L^2 - L_1{}^2}$$

откуда получаем магнитный момент ($B_{\text{зем.}}$ = магнитная индукция земного поля)

$$M = B_{\text{зем.}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L^5 \cdot tg\varphi - L_1{}^5 \cdot tg\varphi\ tg\varphi_1}{L^2 - L_1{}^2}.$$

Интенсивность намагничения или магнитный момент для 1 cm^3 об'ема $I = \frac{M}{V}$, откуда получаем

$$I = \frac{B_{\text{зем.}}}{V} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L^5 \cdot tg\varphi - L_1{}^5 \cdot tg\varphi_1}{L^2 - L_1{}^2}$$

Если $\measuredangle\varphi$ так мал, что тангенс может быть принят равным дуге, то можно $tg\varphi$ заменить числом делений шкалы. Если $B_{\text{зем.}}$ известно, то можно подсчитать I, и из уравнения $B = B_0 + 4\pi.I$ определить магнитную индукцию B в гауссах, так как магнитная индукция B_0 определяется по размерам намагничивающей катушки. Чтобы поле H катушки, создающее в воздухе индукцию B_0 было возможно равномернее, катушку делают очень длинной по сравнению с диаметром (напр., 40 *cm.* длина, 1 *cm.* диаметр). Железный стержень берут несколько короче катушки (около 30 *cm.*) при диаметре $d = 2$ до 3 *mm.*

В этом случае можно подсчитать силу поля внутри катушки

$$H = \frac{J \cdot w}{l}\ \frac{\text{амп. витк.}}{\text{cm.}}$$

и индукцию в воздухе

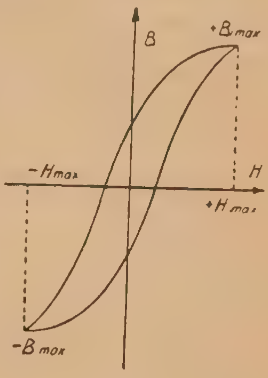
$$B_0 = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{J \cdot w}{l} \text{ гауссов},$$

зная силу тока J, число витков W и длину катушки l *cm.*

Теперь, если нанесем значение B, как ординаты и H, как абсциссы в прямоугольной системе координат, то получим кривую намагничивания $f(B, H)$.

Таким же образом можем снять петлю гистерезиса; для этого мы повышаем силу поля от 0 до $+H_{max}$ (фиг. 168) и затем опять через $H = 0$ до $-H_{max}$ и наконец вновь до $+H_{max}$. Таким путем снимаем большое количество петель; соединяя их вершины последовательно с началом координат, получим опять кривую намагничивания.

Эти данные, однако, не вполне отвечают действительности, так как индукция, фактически действующая на стержень, не равна индукции, определенной только по размерам катушки, без учета влияния введенного в нее магнита. Концы этого магнита, заряженные свободным магнитизмом, оказывают размагничивающее влияние на поле, так как поле магнита противоположно полю катушки. Таким образом, истинная сила поля $H_{ист}$ оказывается меньше полученной вычислением H. Чем длиннее стержень, тем меньше его влияние на поле.



Фиг. 168.

Чтобы иметь возможность определить влияние свободного поля, мы должны допустить, что форма намагничиваемого тела—эллипсоид. Для других форм, например, короткого цилиндрического стержня с плоскими поверхностями концов, точное решение задачи сильно затруднено. Напротив, длинные стержни можно рассматривать как эллипсоиды. В эллипсоиде намагничение I равномерно, так что каждая единица об'ема оказывает одинаковое влияние. Итак, если катушка без железного стержня образует поле

$$H = \frac{J \cdot w}{l} \, \frac{\text{амп. вит.}}{\text{см.}},$$

то вложенный в нее железный стержень, вследствие своего намагничения, ослабит поле на величину H', так что истинное поле, образующее силовой поток, определится уравнением $H_{ист.} = H - H'$. Однако, размагничивающее поле H' можно считать при равномерном намагничении, каким оно и бывает для эллипсоидов, пропорциональным I, из чего следует

$$H' = c \cdot I \text{ или } H_{ист.} = H - c \cdot I.$$

Постоянную c в этом случае называют **коэффициентом размагничения**. Если мы заменим $H_{ист}$ через $\frac{10}{4\pi} \cdot \frac{I}{\kappa}$, где $1 + 4\pi \cdot \kappa = \mu = \frac{B}{B_0}$, то получим

$$H = \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{I}{\kappa} + c \cdot I = I \cdot \left(\frac{\frac{10}{4\pi} + c \cdot \kappa}{\kappa} \right) \text{ и } I = H \cdot \frac{\kappa}{\frac{10}{4\pi} + c \cdot \kappa}.$$

Легко можно подсчитать коэффициент размагничения для эллипсоида вращения с большой осью $2a$ и малою $2b$; если направление намагничения параллельно большой оси, то

$$c = 4\pi \cdot \left(\frac{1}{e^2} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{2e} \cdot \ln \frac{1+e}{1-e} - 1 \right).$$

Для очень вытянутых форм это выражение приближается к величине

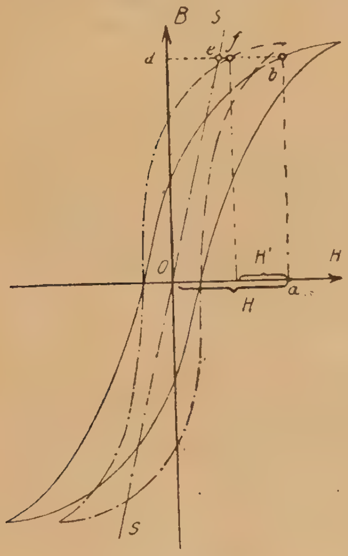
$$c' = 4\pi \cdot \frac{b^2}{a^2} \cdot \left(\ln \frac{2a}{b} - 1 \right).$$

Если мы возьмем для отношения $\frac{a}{b}$ значения 50, 100, 200, 300, 400, 500, то получим для c следующую таблицу:

a/b	50	100	200	300	400	500
c	0,01817	0,00540	0,00157	0,00075	0,00045	0,00030

Отсюда ясно, что для стержней, длина которых больше диаметра в 300 и более раз, можно пренебречь влиянием свободного магнитизма удаленных концов.

Вместо того, чтобы подсчитывать поправки для каждого отдельного значения I и B, можно для определения истинного намагничивания безотносительно к форме тела, применить, предложенный Рэлеем[2]) метод обратного срезывания. Если получена кривая $f(B, H)$, то можно, изменив масштаб, принять ее за $f(I, H)$, для чего в уравнении $I = \frac{B - B_0}{4\pi}$ для сред с большой магнитной восприимчивостью, пренебрежем B_0 по сравнению с B и примем $I = \frac{B}{4\pi}$. Теперь если умножим, напр., относящееся к ab (фиг. 169) значение I на подсчитанный, на основании размеров стержня, коэффициент c, то получим для этого значения I размагничивающее поле $H' = c \cdot I = de$, так что истинное поле $H_{ист.} = H - H' = Oa - de = be$. Итак, чтобы получить истинную кривую намагничивания, откладываем $bf = de$ из b, f и будет одной из ее точек. Таким образом можно было бы повторить построение для всех других точек. Вместо этого, чтобы избежать отдельных подсчетов, мы строим только прямую SS, через точки e и O. Эту прямую называют линией срезывания. Горизонтальные отрезки между этой прямой и осью ординат дают ту величину, на которую должны быть сдвинуты назад лежащие на соответствующих высотах точки петли гистерезиса. Сдвинув эти точки и соединив их получим кривую, нанесенную пунктиром.



Фиг. 169.

На основании изложенного ясно, что кривые должны быть сдвинуты назад при всех измерениях, в которых железный стержень обладает свободными концами, т.-е. когда в магнитной цепи есть воздушный зазор (напр., ярмо, аппарат Кэпселя, магнитные весы и т. д.).

Для этой цели, к аппаратам прилагается линия срезывания для возрастающего и убывающего намагничивания, полученная путем сопоставления кривых данного аппарата с кривыми магнитометрического испытания железных стержней эллипсоидальной формы[3]). Срезывание не оказывает никакого влияния на площадь петли.

Выполнение измерения сложно и затруднено, особенно вследствие „магнитного последействия“ стрелки, явления, которое состоит в том, что в слабых магнитных полях железо принимает свое полное магнитное состояние только по истечении некоторого длительного промежутка времени (многих секунд или даже минут). Поэтому данный метод употребляется только в лабораториях, где его применяют для измерения в абсолютных единицах магнитных эталонов, или для проверки точности магнитоиспытательных аппаратов.

Инструментом при измерении обычно служит, предложенный Кольраушем и Хольборном (Holborn)[4], магнитометр, а для регулированая намагничивающего тока пользуются плавно изменяющим сопротивление жидкостным реостатом, так как намагничивание скачками может исказить результат[5]). Для исследования тел малых размеров Гауптом (Haupt)[6]) предложен магнитометр особой конструкции.

Если исследуемый предмет поднесен очень близко к магнитометру, то отклонения легко могут выйти за пределы шкалы; чтобы избежать этого следует посредством постоянного стального магнита отклонить стрелку несколько назад, к положению покоя. Этот магнит, однако, должен не направлять, а только отклонять стрелку, т.-е. он должен частично уменьшить силу действия намагничиваемого стержня; в то же время он должен лежать перпендикулярно к меридиану на продолжении направления оси намагничиваемого стержня. Угол или число делений, на которое игла отклоняется компенсирующим магнитом, нужно прибавлять к отсчитанной величине. Этот прием особенно удобен при исследовании верхней части кривых намагничивания железных стержней.

Вместо постоянного магнита можно применять компенсирующую катушку, через витки которой протекает тот же ток, что и через намагничивающую катушку. В особом случае, когда действия обоих катушек взаимно уничтожаются, отклонение стрелки будет зависеть только от намагничения железа и индукция в воздухе, создаваемая катушкой, не будет измеряться. Такая установка особенно удобна для коротких стержней и при дифференциальном магнитометре.

Для очень длинных стержней или проволок удобен так называемый униполярный метод, при котором стержень вводится в вертикальную намагничивающую катушку. Чтобы намагничение было равномерным по всей длине проволоки, нужно, чтобы катушка по обе стороны выступала за проволочный сердечник. Так как, благодаря отвесному положению, вертикальная составляющая земного магнитизма намагничивает стержень, то нужно, это действие устранить с помощью компенсирующей катушки, навитой на главную. Через эту компенсирующую катушку пропускают ток такой силы, который создает поле, равное и прямо противоположное земному полю. Чтобы получить этот ток, достаточно элемента Даниэля и маленького жидкостного реостата.

Аппарат, построенный по этому принципу для непосредственного измерения магнитной восприимчивости предложен Мэрдоком (Murdoch)[7]).

Для об'ективного наблюдения петель гистерезиса, получаемых по этому методу, Ангстром (Angström)[8]) поместил трубку Брауна между двумя намагничивающими катушками, положенными по одной оси или параллельно, и двумя перпендикулярно к ним поставленными вспомогательными катушками; железный стержень при этом вкладывался в одну из намагничивающих катушек. Испытания постоянным и переменным током показали округляющее влияние токов Фуко на острия петель.

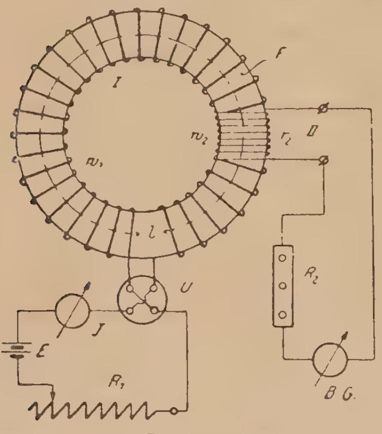
Если мы желаем избежать влияния свободных концов тела на намагничение, то должны придать намагничиваемому куску форму кольца. Благодаря тому, что оно не имеет свободных концов, намагничивающая сила, действующая на него, не будет ослаблена его собственным магнитизмом, т.-е. кольцо не окажет никакого ослабляющего влияния на намагничивающее поле. Но такая форма, без свободных концов, не применима при магнитометрическом измерении. В этом случае нужно применять баллистический метод.

---

1) ETZ. 528 (1907).
2) Phil. Mag. 175 (1886).
3) ETZ. 691 (1901),
4) Ann. d. Ph. 287 (1903).
5) ETZ. 233 (1900); 691 (1901); 988 (1906).
6) ETZ. 1069 (1907); 352 (1908).
7) El. 976 (1913).
8) Oefversigt af Kongl. Vetenskaps-Akadem. Förhandlingar 251 (1899); ZfI 222 (1900) (рефер.).

2. Баллистический метод.

В этом случае магнитную индукцию измеряют по количеству электричества, индуктируемого в катушке, навитой на испытуемое кольцо, ввиду того, что индуктирующий толчек тока должен длиться только короткое время, то пользуются баллистическим гальванометром. Для нашего испытания мы выберем кольцо из однородного материала, если возможно не сваренное, и обовьем его равномерной проволочной обмоткой (*I*) (Кирхгоф), которая по Мэллингеру (Möllinger) [1]) может быть сделана с'емной с помощью вилочных контактов. По этой обмотке должен проходить намагничивающий ток *J* (фиг. 170). Сверху же мы навиваем короткую (вторичную) катушку (*II*) из многих витков тонкой проволоки и присоединяем ее концы через большое сопротивление к клеммам баллистического гальванометра *BG*. Катушка *II* должна быть плотно навита на железо, иначе мы получим для величины *B* в железе слишком большое значение. Первичная катушка включается к источнику тока *E* последовательно с сопротивлением R_1, переключателем тока *U* и амперметром *J*. Если кольцо (торроид) было уже намагничено, то перед испытанием его размагничивают или посредством коммутатора и жидкостного реостата или с помощью постепенно ослабляемого переменного тока. Для построения петли гистерезиса или кривой намагничивания, по методу Вебера и Роуланда (Rowland), мы поступаем следующим образом:



Фиг. 170.

Сначала с помощью отдельного опыта определим добавочное сопротивление, нужное для баллистического гальванометра; затем размагнитим кольцо. После этого включим сопротивление R_1 и пропустим через катушку ток *J*. При этом в кольце создается поле,

силовые линии которого пересекут витки w_2 вторичной катушки, в результате чего в последней появится некоторая эл. дв. сила, которая вызовет, в зависимости от сопротивления вторичной цепи, некоторое количество электричества и тем самым отклонение гальванометра. Это отклонение является мерой образовавшегося магнитного потока. Затем приводим гальванометр опять к нулю посредством мгновенного короткого замыкания или с помощью индуктора Гаусса, т.-е. включенной в цепь катушки, в которой введением магнитного стержня индуктируется некоторая эл. дв. сила. Теперь изменяем R_1 на некоторую определенную величину и наблюдаем вновь полученное отклонение. Таким путем мы доходим до некоторой величины $+J_{max}$, затем скачками уменьшаем силу тока и приходим через нуль к $-J_{max}$, потом опять увеличиваем силу тока таким же образом до $+J_{max}$. При этом ток пройдет полный период, а намагничивание один цикл. По отмеченным для измеренных сил тока отклонениям гальванометра мы можем, подсчетом, найти величины H и B и начертить петлю гистерезиса. В этом случае, намагничение для любого момента определится суммой всех предыдущих отклонений. Для повышения степени точности измерения применяют т. н. мультипликационный метод [2]). Автоматический переключатель для этого предложен Гилье (Guillet) [3]).

Если кольцо имеет среднюю длину l и число витков w_1, то

$$H = \frac{J \cdot w_1}{l} \text{ амп. вит.}/cm.,$$

при J измеренном в амперах. Благодаря этой намагничивающей силе катушки, в кольце возникает индукция B гауссов, при сечении F cm^2., и полный силовой поток будет $\Phi = F \cdot B$ максвелл. Если, вследствие тока J силовой поток в кольце изменяется за время dt на $d\Phi$, то согласно основному закону электромагнитной индукции $\left(E_t = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt}\right)$, во вторичной катушке возникает эл. движ. сила

$e_t = w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$, если мы не будем обращать внимание на знак, который показывает только направление тока. Эта эл. дв. сила вызывает в сопротивлении R вторичной цепи (сопротивлении гальванометра, добавочном и вторичной катушки) некоторый ток $i_t = \frac{e_t}{R}$, на основании чего, подстановкой в вышеупомянутое уравнение, получаем:

$$d\Phi = \frac{R}{w_2} \cdot i \cdot dt,$$

или также

$$e_t \cdot dt = R \cdot i_t \cdot = R \cdot dQ.$$

Если ток J изменяется за время $t_1 + t_2$, то полное изменение потока Φ равно сумме отдельных значений $d\Phi$ или

$$\Phi = \int^{t_2} d\Phi = \frac{R}{w_2} \cdot \int^{t_2} i_t \cdot dt = \frac{R}{w_2} \cdot Q.$$

Количество электричества, сообщенное за это время гальванометру, отклонившемуся на s делений шкалы, согласно законам действия баллистического гальванометра (стр. 119), при демпфировании K, будет

$$Q = Q_d = c_1 \cdot \frac{T}{\pi} \cdot s \cdot K = c_2 \cdot s \cdot K\ .$$

Подставив теперь значение Q в уравнении для Φ, получим:

$$\Phi = \frac{R}{w_2} \cdot c_2 \cdot s \cdot K\ .$$

Так как, при испытании железа, гальванометр демпфирован, то установка, соответствующая условиям этого уравнения, больше подходит для определения постоянной c_2, чем конденсатор. Для определения c_2 в этом случае мы навиваем на деревянное кольцо сечением F_3 и средней длины l_3, w_3 витков и сверху наматываем узкую катушку из w_4 витков, также как для т о р р о и д а. Если теперь пропустить через первичную катушку ток J_3 амп., то возникнет поток

$$\Phi_3 = F_3 \cdot B_{03} = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{J_3 \cdot w_3 \cdot F_3}{l_3}$$

который пройдет и через вторичную катушку при своем возникновении или исчезновении он вызовет, при сопротивлении вторичной цепи R_3, отклонение баллистического гальванометра s_3.

Итак имеем:

$$\left[\Phi_3 = \right] \frac{R_3}{w_4} \cdot c_2 \cdot s_3 \cdot K_3 = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{J_3 \cdot w_3 \cdot F_3}{l_3}$$

или

$$c_2 = \left[\frac{4\pi}{10} \cdot \frac{w_3 \cdot w_4 \cdot F_3}{l_3}\right] \cdot \frac{J_3}{R_3 \cdot s_3 \cdot K_3}\ .$$

Здесь нужно только один раз вычислить выражение в скобках, после чего берут различные значения s_3 соответственно различным токам J_3 и определяют c_2 как среднее из отдельных значений. Далее определяют K_3 для различных значений R_3 и строят кривую f (K_3, R_3). Если отклонение s_3 слишком мало, то точность можно повысить переключая ток с $+J_3$ на $-J_3$. Пусть отклонение при исчезновении тока будет $s_3{}^1$, а при возрастании до $-J_3''$ в том же направлении s_3'' делений шкалы; таким образом изменение тока на $2J_3$ обусловит суммарное отклонение $s_{3\text{сум.}} = s_3' + s_3''$, откуда получим отклонение, соответствующее изменению тока на J_3

$$s_3 = \frac{s_{3\text{сум.}}}{2} = \frac{s'_3 + s_3''}{2}\ .$$

После того, как гальванометр проградуирован, можно определить, по отклонению s, изменение силового потока в исследуемом железном кольце по формуле

$$\Phi = \frac{R}{w_2} \cdot c_2 \cdot s \cdot K\ ,$$

в которой K обозначает коэффициент демпфирования при сопротивлении R вторичной цепи (с гальванометром).

В данном случае мы только сравниваем различные отклонения, поэтому можем для упрощения измерения принять, что коэффициент демпфирования K постоянен в определенных границах, если сохра-

няется пропорциональность между отклонениями гальванометра и изменениями силового потока.

Последнее условие мы проверяем, пропуская различные токи J_3 и наблюдая отклонения s_3. Затем наносим s_3, как функцию J_3 в прямоугольных координатах, полученная кривая $f(J_3, s_3)$ должна быть прямой.

По Кенигсбергеру (Königsberger) [4] для измерения Q можно применять баллистический электрометр, при чем

$$R \cdot Q = \int_{t_1}^{t_2} e_t \cdot dt = e_э \cdot s_э \,.\, K$$

определится по баллистическому отклонению $s_э$.

Если вторичная катушка навита непосредственно на железо, то

$$B = \frac{\Phi}{F}.$$

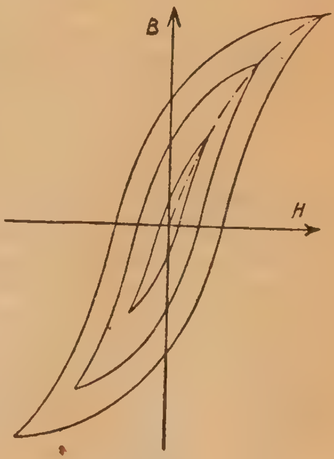
Если же она наложена сверху первичной, то индукция в железе

$$B = \frac{\Phi - (F_3 - F) \cdot B_0}{F},$$

так как часть силового потока пройдет через воздушный кольцеобразный зазор между железом и вторичной катушкой. Эта поправка вообще так мала, что ею можно пренебрегать.

Метод имеет то достоинство, что позволяет точно измерить малые изменения силового потока, недостаток же его заключается в том, что ошибка, сделанная при одном отсчете, войдет во все измерения и повлияет на все точки петли гистерезиса. Правильность результата, однако, можно контролировать тем, что при многократном повторении циклического намагничивания, в одних и тех же границах, должны получаться, одинаковые петли гистерезиса.

Когда, таким путем, снята одна петля, то рекомендуется повысить намагничивание до $+H_{1max.}$ и затем снять новую кривую в границах $+H_{1max.}$ и $-H_{1max.}$. Таким путем можно получить ряд петель, лежащих одна в другой (фиг. 171). Непрерывная кривая, соединяющая острия петель и будет кривой намагничивания $f(B, H)$, на чертеже она нанесена пунктиром. Усовершенствования этого метода предложены Иттербергом (Ytterberg) [5].



Фиг. 171.

Другой метод основан на том, что ток в намагничивающей катушке переключается с $+J$ на $-J$. Намагничение, соответствующее этому току, определяется по половине измеренного отклонения.

Конечно, в этом случае получают не петлю, а среднюю кривую намагничивания. Кроме того, для каждой точки кривой нужно, чтобы получить определенное состояние, много раз переключать ток, пока отклонения гальванометра не станут постоянными. При этом период колебания гальванометра должен быть очень большим. Целесообразно поэтому брать большое напряжение на клеммах E_k и включать большое добавочное сопротивление.

При большой величине самоиндукции, параллельно первичной катушке с амперметром, включают большое сопротивление в качестве уравнительной цепи.

Эвершед (Evershed) и Виньоль (Vignoles) [6]) избегают недостатков метода Вебера и Роуланда таким способом: первичная обмотка разделяется на две намагничивающие катушки, одинаково намотанные, из которых одна состоит из w_1', а другая из вдвое большего $w_1'' = 2w_1'$ числа витков. В первой катушке поддерживается постоянный ток J', соответствующий высшему отрицательному значению $-B_{max.}$. Если мы пропустим через вторую катушку (w_1'') ток J'' одинаковой величины с J', но обратного направления, то получим высшее положительное значение индукции $= B_{max.}$. Если выключим J'', то намагничение пройдет через все значения от $+B_{max.}$ до $-B_{max.}$, Если же теперь пропустим через вторую катушку небольшой ток J'', то получим отклонение гальванометра, соответствующее уменьшению индукции, и отсюда точку кривой намагничивания $f(B, H)$. Перед тем, как снять каждую новую точку, заставляют железо пройти половину цикла, для чего берут $J'' = J'$ и выключают (J''). Таким же образом поступают и при обратном направлении тока $-J'$ и $-J''$.

Изменения этого метода предложены Хольмом (Holm) [7]).

До сих пор нами принималось, что индукция в кольце B может быть вычислена посредством деления силового потока Φ, определенного по отклонению баллистического гальванометра, на сечение F кольца, из уравнения $B = \frac{\Phi}{F}$. Но это верно только при равномерном распределении поля по всему сечению. Для колец это не так, потому что намагничивающая сила уменьшается с увеличением расстояния от оси кольца. Если катушка состоит из w_1 витков, то сила поля

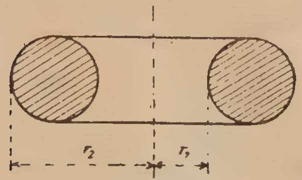
$$H_1 = \frac{J_1 \cdot w_1}{2\pi \cdot r_1} = \frac{c}{r_1}$$

для внутреннего радиуса r_1 (фиг. 172). Для внешнего же радиуса r_2 получим

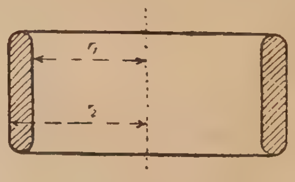
$$H_2 = \frac{J_1 \cdot w_1}{2\pi \cdot r_2} = \frac{c}{r_2}.$$

А так как $r_2 > r_1$, то $H_2 < H_1$ и поэтому индукция на внешнем крае $B_2 < B_1$ на внутреннем крае. В этом недостаток такой формы испытываемого материала, — его влияние можно уменьшить, сделав возможно меньше разность $r_2 - r_1$, т.-е. толщину кольца по отношению к его радиусу. Обыкновенно берут

$$\frac{r_2 - r_1}{r_1} \leq \frac{1}{25}.$$



Фиг. 172.



Фиг. 173.

Чтобы не получить при этом слишком малое сечение, удобно сделать его прямоугольным с закругленными краями, как показано на фиг. 173.

В противном случае, при большой толщине кольца, следует при определении силы поля H вводить среднюю длину

$$l_{\text{сред.}} = \frac{2\pi \cdot (r_2 - r_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

Исследования Кирштэдтера (Kirstädter) [8]) показали различие в намагничении для полых и сплошных колец.

Для употребления в заводской практике Дрейсдэль [9]) построил, основанный на этом методе, пермеаметр, новая форма [10]) которого выполнена фирмой Ducretet & Roger, Paris. Этот прибор позволяет испытывать материал, идущий непосредственно в дело. В этом случае для испытания в исследуемом железе делается дыра 2 *cm.* глубиной и 4 *mm.* в диаметре и в нее плотно вставляется слегка конический штепсель, содержащий первичную и вторичную обмотки. Ток, посылаемый в первичную катушку, переключается, и толчки тока, появляющиеся во вторичной катушке, измеряются приключенным к ней т. н. „флюксметром“, который позволяет отсчитывать непосредственно индукцию B. Углубления в железе могут быть сделаны на тех местах, где потом должны быть дыры или винтовая нарезка.

Некоторое упрощение для технического измерения дает метод Шлейхера (Schleicher)[11]), отличаясь тем преимуществом, что при его применении каждая точка петли может быть повторно снята, независимо от других.

Баллистические методы имеют то преимущество, что индукция в железе почти одинакова по всей длине пути силовых линий, почему не требуется никаких поправок (обратного срезывания) и отсутствует влияние других полей. Зато затруднительно изготовление пробы, трудно градуирование и намагничивание толчками не остается без влияния на результат, как показали Гумлих и Шмидт [12]) и Рюккер (Rücker) [13]).

Напротив, магнитометрический метод обладает преимуществом простоты, т. к. отпадает градуирование. Поэтому он незаменим для поверочных измерений. Благодаря плавному изменению намагничивания устраняются молекулярные толчки. Главный недостаток в неравномерности индукции вдоль стержня, достигающей наибольшей величины в середине, а также в малом количестве испытуемого материала, качества которого легко могут измениться, благодаря вырезыванию или обработке.

Простейший прибор для исследования железа—это измеритель магнитного напряжения Роговского (Rogowsky) [14]). Он состоит из довольно длинной, гибкой, равномерно намотанной катушки. Толчек тока, индуктируемый в ней исследуемым полем, измеряется баллистическим гальванометром. Гольце [15]) обстоятельно описывает применение этого аппарата для испытания железа.

---

1) ETZ 379 (1901). 2) Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Physik 484 (1905).
3) Compt. rend 45 (1908), Zfl. 202 (1909) (рефер.)
4) Ann. d. Phys. 506 (1901); Zfl. 287 (1902) (рефер.). 5) AfE. 339 (1914). ETZ 375 (1915).
6) El (29) 583 (1892); ETZ 151, 672 (1894) 7) Diss. Berlin 12 (1912).
8) Ann. d. Ph. 65 (1898).
9) El. 267 (1901); Journ. Inst. El. Eng. 283 (1902); Zfl. 130 (1902) (рефер.).
10) El. Anz. 971 (1909) Rev. part. de l' Electr. 275 (1910); Ann. d. El. 139 (1910) (рефер.); Der Mechaniker 220 (1909). 11) ETZ. 393 (1918).
12) ETZ. 233 (1900). 13) ETZ. 904 (1905).
14) AfE. 141 (1912); 511 (1913); ETZ. 719, 779 (1913). 15) AfE 303 (1914).

3. Метод магнитного перешейка. Юинг (Ewing).

(Англ. Isthmus method).

Этот метод предложен Юингом и Лоу (Low) [1]) для исследования особенно сильных индукций ($>$20.000 гауссов), которые нельзя получить описанными выше вспомогательными средствами. Испытуемый кусок железа вставляется в качестве перешейка или мостика между двумя коническими полюсными наконечниками сильного магнита. На эту маленькую цилиндрическую пробу железа надета индукционная катушка, приключенная к баллистическому гальванометру. Чтобы определить силовой поток в катушке не выключают намагничивающий ток, а поворачивают испытуемый кусок железа на 180°. Неудобство строившихся для этого аппаратов заключалось в том, что из испытуемого материала должны были быть изготовлены оба конические наконечника, вращавшиеся вместе с перешейком как одно целое В результате было трудно определить силу поля в перешейке.

Эти недостатки устранены в приборе, сконструированном PTR для практического употребления [2]). В нем сменяется только перешеек, сделанный из испытуемого материала в виде цилиндра 3 *mm* в диаметре и 28 *mm* длиной, а конические части остаются одни и те же. На испытуемый стержень плотно надета индукционная катушка 20 *mm* длиной, а сверх нее на плотной прокладке навита вторая. Стержень выступает за края катушки на 4 *mm* с каждой стороны.

Если приключим только одну внутреннюю катушку к баллистическому гальванометру, то при повороте конусообразных наконечников, по отклонению гальванометра, можем определить индукцию B в испытуемом стержне. Если же приключим обе катушки к гальванометру, одну навстречу другой, то отклонение определит только силу поля H в воздухе в промежутках между катушками.

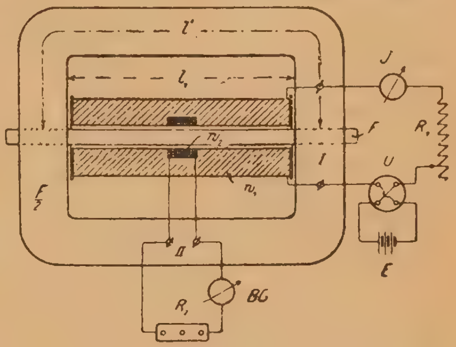
Применяя полукольцевой электромагнит Дю Буа (Hartmann & Braun) можно довести намагничивание до 4000 $\frac{\text{амп. вит.}}{\text{cm.}}$, а надвинув узкие кольца на испытуемый стержень, чтобы сократить перешеек, даже до 6000 $\frac{\text{амп. вит.}}{\text{cm.}}$. При этом имеется еще то преимущество, что можно итти вниз до $H = 100 \frac{\text{амп. вит.}}{\text{cm.}}$, причем полученные величины можно сравнить с результатами измерения по методу ярма. Данный аппарат удовлетворяет потребностям техники в приборе для исследования высоких насыщений, так как, например, для зубцов якорей электрических машин употребляются очень высокие насыщения, и применение этого железа при построении моторов переменного тока и трансформаторов делает чрезвычайно желательным точное определение границ насыщения.

---

[1]) Proc. Roy. Soc. London, März (1887); Phil. Trans. 221 (1889A).
[2]) ETZ. 1065, 1096 (1909).

4. Испытание железа по методу ярма Гопкинсона (Hopkinson).

Гопкинсон[1]) избежал недостатков вышеописанных методов тем, что поместил концы испытуемого стержня в отверстия массивной рамы или ярма большого сечения (фиг. 174). Эта рама служит как замыкающий магнитопровод для силового потока стержня; поэтому если пренебречь влиянием стыков, здесь получается замкнутая цепь. Чтобы иметь право пренебречь сопротивлением ярма по сравнению с сопротивлением стержня, нужно, чтобы ярмо, кроме большого сечения, обладало большой магнитной проницаемостью μ; для этого оно должно быть сделано из лучшего литого железа, или этим способом рекомендуется исследовать стержни с относительно малой магнитной проницаемостью, например, из стали или твердого железа. Ошибку, вызываемую влиянием стыков, стремятся уменьшить, применяя конические зажимы для отверстий.



Фиг. 174.

Сверх стержня по всей длине надета намагничивающая катушка из w_1 витков, длиною l_1; в ее средней части, а еще лучше внутри нее, намотана вторичная катушка из w_2 витков очень тонкой проволоки. Для измерения применяют включение по схеме фиг. 174. Первичную катушку (I) соединяют через переключатель U, сопротивление R_1 и амперметр J с источником тока E. Вторичную катушку (II) приключают через дополнительное сопротивление R_2 к баллистическому гальванометру BG. Само измерение производится таким же порядком, как и для баллистического метода с кольцом. Однако, по отношению к полученной кривой нужно проделать обратное срезывание, так как на намагничивание ярма и воздушного промежутка затрачивается некоторая магнитодвижущая сила, вследствие чего действующая на стержень $H_{ист.}$, будет меньше, чем

$$H = \frac{J \cdot w_1}{l_1} \quad \frac{амп.\ вит.}{см.}$$

Если сечение каждой половины ярма $\frac{F'}{2}$ и средняя длина l', то согласно закону Гопкинсона для замкнутой магнитной цепи:

Магн. дв. сила = силовому потоку $\times$ магн. сопрот.

$$J \cdot w_1 = \Phi \cdot \frac{10}{4\pi} \left[\frac{l_1}{F \cdot \mu} + \frac{l'}{F' \cdot \mu'} + \frac{\delta}{F''} \right],$$

где δ и F'' представляют длину и сечение воздушного промежутка, эквивалентного стыкам. Силовой поток $\Phi = B \cdot F$ определяем по отклонению баллистического гальванометра.

Если мы подставим в уравнение это значение, то получим:

$$J \cdot w_1 = 0{,}8 \cdot \left[\frac{B_1 \cdot l_1}{\mu} + B \cdot \frac{l' \cdot F}{F' \cdot \mu'} + B \cdot \frac{\delta \cdot F}{F''} \right].$$

Разделив уравнение на l_1 и подставив

$$\frac{B}{\mu} = B_0 = \frac{1}{0,8} \cdot H_{ист.} ,$$

найдем:

$$H_{ист.} = \frac{J \cdot w_1}{l_1} - B \cdot 0,8 \cdot \frac{l' \cdot F}{l_1 \cdot F' \cdot \mu'} - B \cdot 0,8 \cdot \frac{\delta \cdot F}{l_1 \cdot F''}$$

$$= H - B(c_1 + c_2) = H - H' .$$

Первый член правой половины уравнения легко определить. Если дана кривая намагничивания материала ярма, то известно и μ', благодаря чему можно также вычислить и второй член, так как прочие величины доступны измерению. В последнем члене трудно определить δ и F''. Однако ошибку можно уменьшить, взяв большие μ', F и F'' и малое δ, т.-е. выбрав лучший материал и бóльшое сечение ярма и, кроме того, возможно тщательнее соединив стержень с ярмом. Вообще же, для точных измерений предварительно экспериментально определяют линию срезывания $f\,(H', B)$ ярма и пользуются ею для дальнейших измерений, хотя величина μ', содержащаяся в коэффициенте c_1 и не является вполне постоянной, а несколько зависит от B в предшествующем намагничении.

В я з к о с т ь магнитного материала при очень мягком материале, слабом поле, большом сечении стержня и небольших скачках может вызвать то, что найденное значение индукции окажется на много процентов меньше истинного. Это произойдет благодаря тому, что часть силовых линий не будет измерена вследствие относительно малого периода колебания гальванометра по сравнению с временем магнитного запаздывания. Поэтому правильнее определять петлю гистерезиса из данных, полученных путем переключения при одинаковой величине намагничивающей силы, так как при таком способе нет влияния вязкости.

Посредством магнитометрического определения коэрцитивной силы можно далее, по Г у м л и х у и Ш м и д т у[2]), определить линию срезывания для максимальной магнитной проницаемости.

Несмотря на это повышение точности в общем практичный и удобный способ ярма стоит позади магнитометрического метода и метода кольца. Однако, для практики даваемые им результаты достаточно точны, так как ошибка, вызываемая неоднородностью испытуемого материала больше ошибки метода.

Чтобы устранить влияние ярма и воздушного зазора Ю и н г (Ewing) применяет два стержня из испытуемого материала, которые соединяются между собой посредством двух кусков ярма. При длине промежутка в ярме l_1 и w_1 намагничивающих витках, при различных токах J, находят с помощью баллистического гальванометра, включенного на вторичную катушку, индукцию B при силе поля

$$H_1 = \frac{J \cdot w_1}{l} \quad \frac{амп.\ вит.}{cm.} ,$$

на основании чего строят кривую $f\,(B, H_1)$. Затем заменяют намагничивающую катушку другой с $w_2 = \frac{w_1}{2}$ витков и длиной $l_2 = \frac{l_1}{2}$, после чего определяют новую кривую $f\,(B, H_2)$.

Если обозначим через $H \cdot l_1$ и $H \cdot l_2$ магнитодвижущую силу, нужную в обоих случаях—только для стержня, при одинаковой индукции B, и m—магн. дв. силу для ярма со стыками, то будем иметь уравнения

$$1.\quad H_1 \cdot l_1 = H \cdot l_1 + m .$$

$$2.\quad H_2 \,.\, l_2 = H \cdot l_2 + m .$$

Подставив $l_2 = \frac{l_1}{2}$ и вычтя второе уравнение из первого, получим:

$$3.\quad H_2 - H_1 = \frac{m}{l_1} .$$

Из уравнения 3 и 1 тогда находим:

$$H = H_1 - (H_2 - H_1) .$$

и истинную кривую намагничивания $f\,(B\,,\,H)$ стержня получим, если вычтем из соответствующего B значения абсциссы кривой $f(B\,,\,H_1)$ разность абсцисс $H_2 - H_1$ соответствующую этому же B, т.-е. если сдвинем назад первоначально снятую кривую на длину отрезков, лежащих между обоими кривыми.

Такого же рода установка предложена Бэрроузом (Burrows) [3].

На другом принципе, данном еще Шмоллером (Schmoller) [4], основан пермеаметр Пику (Picou) [5].

В этом приборе проба снабжена первичной и вторичной обмотками и замкнута с обоих сторон ярмами, которые также снабжены намагничивающими катушками. Ярма возбуждаются током i так, что вдоль оси пробы не идет никакого силового потока. Затем изменяется направление тока в одной катушке ярма и возбуждается катушка пробы из w витков, током J до тех пор, пока в ярме не получится тот же силовой поток, что и раньше; это определяется с помощью маленького вспомогательного трансформатора с переменным воздушным зазором, в котором первичная обмотка включена последовательно с возбуждением ярма, вторичная же действует на баллистический гальванометр навстречу вторичной катушке испытуемого тела. Силовой поток в ярме в обоих случаях один и тот же, если гальванометр не дает отклонения. После этого, трансформатор отключается и переключается направление токов i и J. Тогда отклонение гальванометра будет мерой индукции в испытуемой пробе. Таким образом, в приборе устранено влияние ярма и стыков, и можно непосредственно найти $H = \frac{J \cdot w}{l}$ где l свободная длина пробы между ярмами.

Подобным же образом построен и прибор для испытания железа Каппа (Kapp) [6].

У крутильного пермеаметра Бейли (Baily) [7], изготовляемого фирмой Carpentier, ярмо снабжено углублением, в котором помещена вращающаяся магнитная стрелка. Вращение, вызываемое магнитным полем, уравновешивают крутильной пружиной. Лэмб (Lamb) и Уокер (Walker [8]) определяют магнитную проницаемость с помощью ярма, в котором магнитное сопротивление пробы железа уравновешивается изменением воздушного зазора.

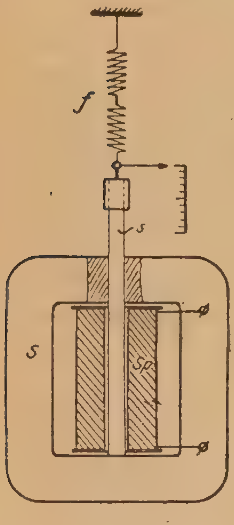
Для определения высоких индукций, при силе поля до 6000 $\frac{\text{амп. вит.}}{\text{cm.}}$ Гумлих[9]) употребляет метод магнитного перешейка в соединении с ярмом.

---

1) Phil. Trans. 455 (1885).
2) ETZ. 696 (1901).
3) ETZ. 10 (1917).
4) ETZ 406 (1892).
5) El. (9) 11 (1906); El. u. M. Wien 36, 1907 (рефер)..
6) ETZ 833 (1908).
7) El. 172 (1901); Zfl. 258 (1902) (рефер.).
8) ETZ 967 (1901); Journ. Inst. El. Eng. (30) 930.
9) AfE. (2) 461; ETZ. 123 (1916).

5. Метод отрывания.

Исходя из того, что сила магнитного притяжения находится в определенном отношении к магнитной индукции B, Бозанке (Bosanquet)[1]) сконструировал аппарат, а С. Томпсон (S. Thompson)[2]) сконструировал целую установку, которую он назвал пермеаметром.



Фиг. 175.

Испытуемый железный стержень s стоит вертикально в отверстии, высверленном в ярме S (фиг. 175), и упирается своим нижним, тщательно отшлифованным, концом также в тщательно отшлифованную внутреннюю поверхность ярма. Намагничение при этом возбуждается катушкой Sp. Сверху стержень подвешен на пружинных весах f. Если ток в катушке выключен, то пружинные весы показывают только P_1—вес стержня. Если пропустить ток, то стержень намагнитится и крепко пристанет к ярму. По мере опускания ярма пружинные весы будут все более растягиватся, пока, наконец, не оторвут стержень от ярма при показании P_2. Сила магнитного притяжения тогда будет $P = P_2 - P_1$.

По Максвеллу сила притяжения магнитного стержня

$$P = \frac{F \cdot B^2}{8\pi \cdot 981 \cdot 10^3} \text{ kg},$$

если принять, что размагничение и рассеяние исчезающе малы. Если P и F измерены в kg. и соответственно в $cm.^2$, то получим

$$B = \sqrt{8\pi \cdot 981 \cdot 10^3} \cdot \sqrt{\frac{P}{F}} = 4963 \cdot \sqrt{\frac{P}{F}} \text{ гауссов.}$$

В нашем случае, когда намагничивающая катушка возбуждает еще индукцию B_0, сила отрывания зависит только от величины $B - B_0$, так как катушка при отрывании не сдвигается; поэтому для данного прибора.

$$P = \frac{F \cdot (B - B_0)^2}{8\pi \cdot 981 \cdot 10^3}$$

или

$$B = 4963 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{F}} + B_0 .$$

Вследствие изменяющегося сопротивления стыков и неравномерного распределения линий индукции при переходе из тонкого стержня в широкое ярмо—точность аппарата не очень велика, однако метод удобен для быстрых и взаимно сравнимых исследований отдельных проб железа.

Капп [3]) изменил установку тем, что разрезал стержень и отрывал не весь стержень, а только его нижнюю часть; последнюю он поместил для уменьшения трения в тщательно обработанную бронзовую направляющую. Несмотря на эти улучшения точность результата не выше 5% при индукции $B > 10000$.

Аппарат может дать точные результаты только в том случае, когда не имеет места отрывание двух касающихся железных частей. Это осуществлено, например, в предложенных дю Буа (H. du Bois) магнитных весах (§ 6).

Жилль (W. Gill) [4]) изменил этот метод тем, что стягивал и вновь надевал намагничивающую катушку на стержень. При этом магнитное состояние проходило полпериода перемагничивания. Этот же опыт он повторял при обратном направлении тока. Посредством очень остроумного приспособления сила, требуемая для движения, регистрируется прибором и посредством механического интегратора дается непосредственно работа, затраченная на гистерезис. Прибор применим, конечно, только до тех пор, пока магнитное сопротивление воздуха велико по сравнению с сопротивлением стержня, т.-е. для пропорциональной части кривой намагничивания.

---

1) El. (13) 83.
2) Journ. Soc. Arts. Sept. 1890
3) El. (32) 498; Lum. el. (51) 584; ETZ. 264 (1891).
4) El. 24. Sept. (1897); ETZ. 5 (1898).

---

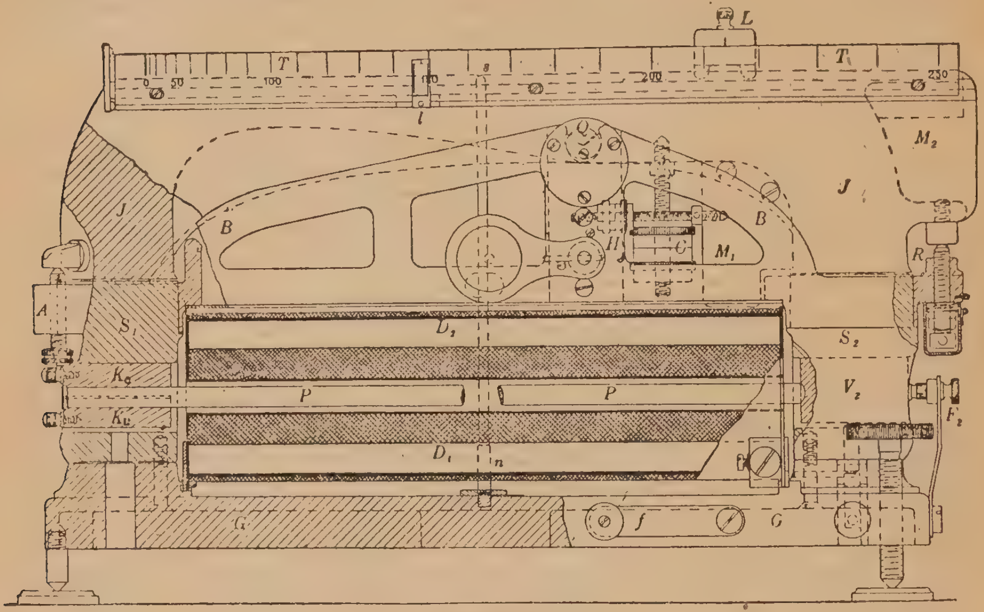
6. Магнитные весы.

Магнитные весы также основаны на действии магнитного притяжения. Первая конструкция [1]) была предложена Дю Буа и, после произведенных в PTR [2]) опытов, дана с некоторыми улучшениями в новой форме [3]), показанной на фиг. 176.

Конструкция и способ употребления следующие:

На литой томпаковой плите G укреплены, посредством винтов, два стальных литых цоколя S_1 и S_2. Верхними концами они плотно соединены между собою посредством литого бронзового мостика B, надетого в разогретом состоянии. В цоколях оставлены отверстия для установительных V_2 и клеммовых K_o и K_u зажимов куда вводится проба железа. Наряду с установочным приспособлением, на мостике имеется подшипник для опорной призмы Q ярма J. Последнее выполнено в форме коромысла весов. Подшипник установлен эксцентрично на расстоянии 4 *cm.* от середины коромысла весов. Кругообразные поверхности цоколя и ярма параллельны и хорошо центрированы, поверхность их около 18 *cm*²., они ограничивают два воздушных промежутка приблизительно по 0,025 *cm.* каждый.

Литое стальное ярмо, снабженное двумя упорами из неокисляющейся фосфористой бронзы, качается с зазором около 0,01 *cm.* между регулирующим винтом K и упорным винтом A. Верхняя часть ярма выполнена в форме полозьев для подвижного груза L, который может



фиг. 176.

передвигаться вдоль квадратично подразделенной шкалы T. Для грубого тарирования служат два свинцовых тела M_1 и M_2. Более тонкая установка достигается с помощью передвигающегося в вертикальном направлении груза C и подвижного в горизонтальной плоскости груза H.

Обычно берется проба железа сечением 0,5 cm^2. с диаметром 0,798 *cm.* для круглого и длиной кромки 0,707 *cm.* для квадратного сечения. Для более точной работы следует снабдить стержень на концах выпуклыми шарообразными контактами радиусом 0,5 *cm.* и зажать его в зажимах, снабженных соответствующими вогнутыми поверхностями. Пружина F_2 прижимает с силой около 3 *kg*, шарообразный контакт к стержню. Длина пробы между обоими верхушками должна быть 25,4 *cm.*, так что при высоте вершин 0,2 *cm.* внутреннее расстояние между зажимами будет 25 *cm.* и средняя длина стержня $l = 25{,}2 = 8\pi$ *cm.* Если используются зажимы клемм, то стержень должен иметь длину 33 *cm.*

Сверх испытуемого стержня на двух параллельных поперечинах основной плиты расположена передвигающаяся намагничивающая катушка. Она состоит из внутренней катушки D_1 с 12 слоями, по 200 витков каждый, медной проволоки 1 *mm.* толщиной; и внешней катушки навитой на латунной трубке в два слоя по 200 витков. Эти катушки включены последовательно, так, что их поля, при протекании тока действуют в противоположном направлении; этим устраняется индукция в воздухе между испытуемым стержнем и возбуждающей катушкой.

Магнитодвижущая сила возбуждающей катушки будет

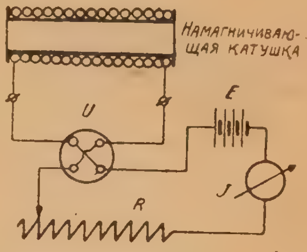
$$M = J\ (w_1 - w_2) = J \cdot 2000 \text{ амп. витков.}$$

Следовательно при длине стержня $l = 8\pi$ *cm.* получим силу поля

$$H = \frac{M}{l} = 80 \cdot J \frac{\text{амп. вит.}}{\text{cm.}}.$$

Для установки на положение равновесия, конечно неустойчивое, служат подвижные грузы в 65 и 2,6 *gr.* весом; их передвигают до тех пор, пока упор не начнет отделяться от винта R. Цифры, отсчитанные на шкале (для большого груза—черная верхняя шкала, для меньшего—красная нижняя), дают по умножении на 100 прямо значение индукции B в гауссах. Большим грузом пользуются для индукций свыше 5000 гауссов.

При исследовании проб железа весы устанавливают длинной стороной с востока на запад, чтобы избежать азимутного влияния земного поля, и, сняв ярмо, устанавливают горизонтально цоколя. Затем ярмо кладется призмами на две стеклянные пластинки, время качания регулируется посредством вертикального груза C на $30 \div 40$ секунд, посредством горизонтального груза H верхний кант ярма устанавливается приблизительно горизонтально и, наконец, ярмо кладется на арретир. Для уравнивания вертикальной составляющей земного поля и других полей, воздействующих извне на аппарат, служат поставленные вертикально на основной плите подвижные уравнительные магниты *n s*.



Фиг. 177.

Аппарат включается согласно схеме фиг. 177, где U—переключатель, J—амперметр приблизительно на 5 амп., E—батарея с напряжением около 30 вольт и R—регулируемое сопротивление около 10.000 Ω. Если амперметр содержит магнит, то он должен быть поставлен возможно дальше от весов, равным образом должны быть удалены предметы из стали или железа и индуктивное добавочное сопротивление.

Для определения нулевой точки стержень из мягкого материала зажимается в клеммы и значения индукции отсчитываются при различных направлениях постоянного по силе (около 1,5 амп.) возбуждающего тока. Эти отсчеты вообще будут различны. После многократной перемены направления тока, постепенной перестановкой уравнительных магнитов достигают того, что неравенство отсчетов исчезает. Затем весь аппарат тщательно размагничивается посредством переключения, уменьшаемого по силе тока, и груз H устанавливается так, что коромысло весов отходит от винта R именно тогда, когда подвижный груз стоит на нуле Затем, удалив железный стержень и возбудив катушку, получают непосредственно индукцию B_0 катушки. После этого испытуемый стержень вставляют в клеммы, тщательно размагничивают и, на основании 10-кратного циклического перемагничивания посредством постепенного изменения добавочного сопротивления R, снимают полную петлю гистерезиса. Отсчитанные значения B наносятся графически, как функция силы поля H, и, наконец, кривая сдвигается назад с помощью приложенной к аппарату линии срезывания, зависящей только от размера и материала весов.

Этим аппаратом можно также испытать и листовое железо, для чего пластины величиной $0{,}707 \times 33$ *cm* укладываются одна на другую и зажимаются в клеммы K.

Изготовляемые Siemens & Halske прецизионные магнитные весы приспособлены для того, чтобы производить измерение в возможно короткое время без хлопотливых вспомогательных приспособлений. При этом ошибка измерения достигает 1%.

На подобном же принципе основаны магнитные весы, построенные Юингом [4]) для заводской практики. Для них требуется обработка только одной поверхности, а не всего стержня. Точность измерения зато несколько меньше.

Мэрдок [5]) определяет в своем пермеаметре силу отрывания, которая нужна, чтобы снять с гладкой поверхности подковообразного магнита пробу призматической формы. Здесь источником ошибки является то обстоятельство, что сила трения для состояния покоя—другая, чем для движения. Далее не устраняется влияние рассеяния и неравномерного распределения силового потока в теле пробы. Неточность $<5\%$.

Магнитные весы для высоких индукций сконструированы Коттоном (Cotton) [6]).

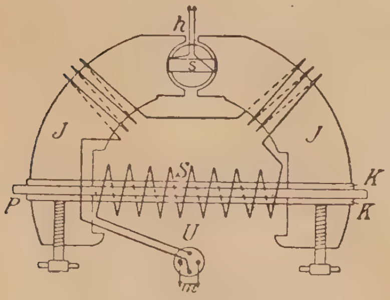
---

1) El. 448, 501 (1892); Zfl. 404 (1892); ETZ. 579 (1892).
2) Zfl. 353 (1896); ETZ. 208 (1897).
3) Zfl. 113, 129 (1900).
4) Journ. Inst. El. Eng. 526 (1898); ETZ. 325 (1898); El. 110, 148 (1898); Zfl. 222 (1899) (рефер.).
5) El. Eng. 28 Nov. (1907); El. u. M., Wien. 36 (1908) (рефер.).
6) Journ. de phys., 3 Serie (9) 383 (1900); ETZ. 449 (1909).

7. Аппарат Кэпселя (Köpsel).

(Siemens & Halske).

Отклонение гальванометра с подвижной катушкой в магнитном поле может быть выражено уравнением $\alpha = c \cdot i \cdot B$. Если поддерживать постоянной силу тока i, то отклонения будут пропорциональны только индукции ($\alpha = c \cdot B$), и такой прибор можно использовать для измерения магнитных полей, как это и сделано в аппарате Кэпселя [1]), изготовляемом Siemens & Halske.



фиг. 178.

Конструкция аппарата показана на фиг. 178. Испытуемый стержень P вложен в намагничивающую катушку S и замкнут с помощью ярма J, из мягкого кузнечного железа, и зажимов K в магнитную цепь. Ярмо снабжено цилиндрической выемкой для помещения маленькой катушки s из большого числа витков тонкой проволоки. Для компенсирования влияния потока рассеяния возбуждающей катушки, на ярме устроены две вспомогательные катушки, которые создают слабое поле, направленное навстречу полю катушки S (сравнить магнитные весы, § 6).

Если пропустить через катушку s постоянный по силе вспомогательный ток i и возбудить катушку S намагничивающим током J, то катушка s получит отклонение, пропорциональное индукции B, стрелка покажет это отклонение на шкале. При свободной длине

стержня $4\pi \simeq 13$ *cm.* катушку S и вспомогательные катушки делают с таким числом витков, что сила поля $H = 80 \cdot J \frac{\text{амп. вит.}}{cm.}$. Посредством соответствующего выбора тока i можно достичь того, что для любого сечения F пробы P, отклонение стрелки прибора непосредственно покажет на шкале число силовых линий на 1 cm^2. или индукцию B в гауссах. Требуемая для данного сечения сила тока в катушке s (постоянная во все время опыта) определяется из уравнения $i = \frac{c}{F}$, где c обозначает постоянную данную на шкале прибора. Аппарат соединяет простоту и удобство способа употребления с относительно большой точностью (для промышленных измерений).

Для об'ективного изображения петли гистерезиса еще Юинг [2]) построил так называемый курвограф. Кривая описывается одновременным движением точки в двух взаимноперпендикулярных направлениях (сравнить также телаутограф Груна (Gruhn) [3]). Смещение в этих направлениях создается двумя проволоками, обтекаемыми намагничивающим током по принципу электродинамического взаимодействия проводника с током в магнитном поле. Одна из этих проволок установлена в постоянном поле (амперметр), другая же в поле испытуемого стержня (магнитометр).

Коттон [4]) измеряет силовое действие P, которое испытывает одна сторона катушки длиною l, обтекаемая током постоянной силы i в исследуемом магнитном поле, причем сила $P = \frac{B \cdot i \cdot l}{10 \cdot g}$ грамм.

При этом сама катушка укреплена на конце коромысла весов, и ей придана форма дуги, чтобы она не влияла на работу весов.

---

1) ETZ. 214 (1894); 411 (1898); ETZ. 39 (1898).
2) ETZ. 451 (1893).
3) ETZ. 117 (1902); 382 (1905).
4) Journ. de phys. 383 (1900); ZfI. 307 (1900) (рефер.).

---

8. Измерение магнитного поля висмутовой спиралью.

Открытое Риги (Righi) свойство висмута, изменять свое электрическое сопротивление при введении в магнитное поле, в согласии с явлением Халля (Hall), может быть использовано для измерения индукции магнитных полей в том случае, когда нужно исследовать не вполне замкнутую магнитную цепь, например, динамомашины. Это свойство впервые было использовано для измерения магнитных полей Ледюком (Leduc) [1]); однако первый практически применимый инструмент построили только Ленард (Lenard) и Хоуард (Howard) [2]). Для этой цели они намотали бифилярно в плоскую спираль химически чистую изолированную висмутовую проволоку толщиной в 0,5 *mm* и для предохранения заклеили ее между двумя слюдяными пластинками. Концы спирали припаяны к двум плоским медным стерженькам, которые вделаны в эбонитовую рукоять с двумя зажимами на конце. Толщина спирали, вместе с предохранительной покрышкой, около 1 *mm,* так что ее можно вводить в очень узкие воздушные зазоры электромашин.

Мерой для индукции служит изменение сопротивления, а именно индукция $B = 1000$ гауссов в среднем вызывает уменьшение сопро-

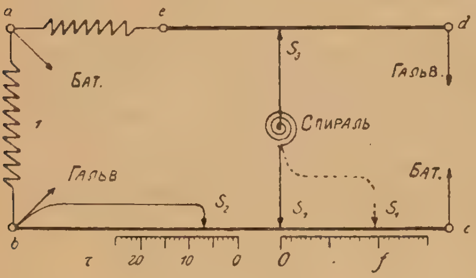
тивления почти на 5%. Для точного измерения полей фирма Hartmann & Braun, которая изготовляет эти спирали, прилагает к каждому инструменту градуировочную кривую.

Hartmann & Braun пользуется висмутовой спиралью также для испытания проб железа по методу ярма. Спираль устанавливается между хорошо отшлифованными концами двух частей пробы, в середине намагничивающей катушки. Поток в пробе проходит при этом перпендикулярно через плоскость спирали.

Для измерения уменьшения сопротивления

$$Z = \frac{R_f - R_0}{R_0}$$

целесообразно пользоваться следующим включением по схеме мостика (фиг. 179). К измерительной проволоке $b\ c$ с ползушками S_1 и S_2 приключаются сопротивления $ba = 1\ \Omega$ и ae, равное сопротивлению спирали при низшей температуре и, наконец, измерительная проволока ed с ползушкой S_3. Далее S_1 устанавливают на нуль, S_2 на число соответствующее температуре среды θ^0 и S_3 передвигают до тех пор, пока в мостике не установится равновесие. Затем спираль вводят в измеряемое поле и передвигают S_1 к f до тех пор, пока вновь не получат равновесия. Тогда $of = Z$ представляет собой уменьшение сопротивления, которое можем прочесть непосредственно на шкале. При пользовании одной определенной спиралью шкала может быть проградуирована непосредственно в единицах индукции, т.-е. в гауссах.



Фиг. 179.

Вариант этого метода предложен Пейкертом [3]).

---

[1]) Journ. de phys. 184, Serie 6 (1887).
[2]) ETZ. 340 (1888).
[3]) ETZ. 636 (1910).

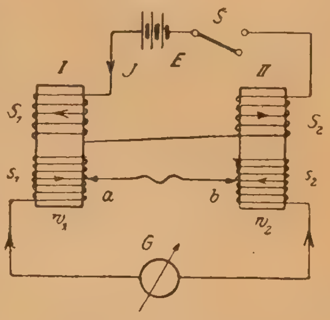
9. Нулевой метод для испытания железа.

Для магнитной цепи имеют место отношения, подобные электрическим, поэтому можно испытывать магнитные материалы, включив их по схеме, аналогичной схеме мостика Уитстона. При этом можно применять два метода. Первый: создают одинаковую магн. дв. силу в сравниваемых железных телах и изменяют магнитное сопротивление одного из них, пока магнитная стрелка, введенная в поток рассеяния обоих тел, не покажет отсутствие отклонения; второй: определяют при различном магнитном сопротивлении стержней одинаковых размеров, магн. дв. силы, которые удовлетворяют тому же условию. На первом принципе основан дифференциальный магнитометр Эйкемейера (Eickemeyer) [1]) на втором—мостик магнитных проницаемостей Юинга и Хольдена (Holden).

Более точный и относительно более простой метод дан Гольдшмидтом (R. Goldschmidt) [2]).

Он основан в принципе на следующем соединении (фиг. 180).

В две намагничивающие катушки S_1 S_2 и вложено по куску железа I и II; на концы последних надето по вспомогательной катушке из w_1 и w_2 витков. Обе катушки включаются так, что эл. дв. силы, индуктируемые в них при исчезновении поля, действуют навстречу, что может быть установлено с помощью вольтметра. Для изменения числа витков w_1 и w_2 служат две иглы, соединенные между собой проводником; ими легко прокалывать изоляцию. Если в железных телах имелись силовые потоки Φ_1 и Φ_2, то в катушках s_1 и s_2 будут индуктироваться эл. дв. силы



Фиг. 180.

$$E_{1t} = -w_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad \text{и} \quad E_{2t} = -w_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt},$$

из чего следует

$$\int_0^t E_{1t} \cdot dt = -w_1 \cdot \int_0^{\Phi_1} d\Phi_1 = -w_1 \cdot \Phi_1$$

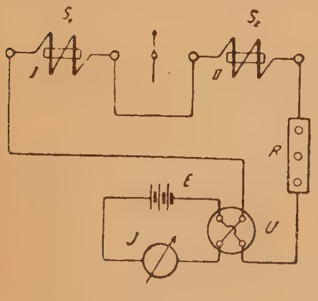
и

$$\int_0^t E_{2t} \cdot dt = -w_2 \cdot \int_0^{\Phi_2} d\Phi_2 = -w_2 \cdot \Phi_2 .$$

Теперь, если число витков подобрано так, что при выключении тока возбуждения вольтметр не дает отклонения, то $E_1 = E_2$ и вместе с тем $w_1 \cdot \Phi_1 = w_2 \cdot \Phi_2$
или

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{w_2}{w_1},$$

т.-е. поля относятся обратно пропорционально числам витков. Приведенное уравнение верно лишь в том случае, если время исчезновения силовых линий мало по сравнению с периодом колебания подвижной системы вольтметра, что, однако, по большей части и имеет место.

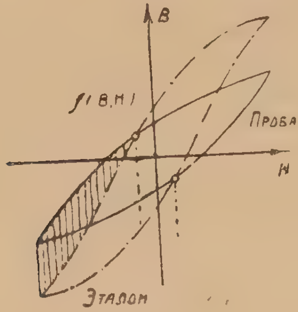


Фиг. 181.

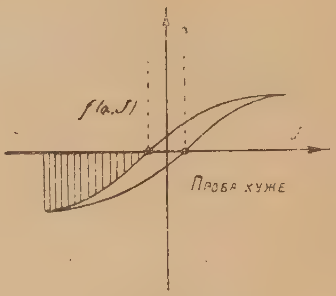
Для быстрого сравнения проб железа фирмой Th. Edelmann, München, построен **дифференциальный магнитометр**, аналогичный по принципу с дифференциальным гальванометром. Как видно на фиг. 181, пробы железа, действующие на магнитную стрелку, помещаются горизонтально в катушки S_1 и S_2 так, что при определенном включении на магнитную стрелку будет действовать только разность силовых потоков. На схеме S_1 и S_2—две намагничивающие катушки, R—регулируемое сопротивление, U—переключатель, E—источник тока и J—амперметр. Отсчет производят посредством зрительной трубы или светового пятна. Ось катушек устанавливают в направлении меридиана

(см. дифференциальный гальванометр), и включают их так, чтобы они действовали одна навстречу другой. Затем катушки передвигают до тех пор, пока отклонение стрелки не будет оставаться равным нулю при различных силах тока.

В катушку S_1 вводят эталонную пробу железа I, а в катушку S_2 испытуемую пробу II тех же размеров, что и I. Регулируя сопротивление R, изменяют намагничивающий ток J между положительным и отрицательным максимумами и отмечают отдельные отклонения α.



Фиг. 182.



Фиг. 183.

Графика f (α, J) представляет собой, конечно, только относительную петлю гистерезиса, площадь которой даст разность качества обеих проб железа. Чтобы определенно установить, какое железо лучше, вынимают пробный стержень из катушки; если при этом отклонение станет больше, то проба хуже и наоборот. Чем меньше разница, тем кривая больше приближается к оси абсцисс и, наконец, совпадает с ней при одинаковом качестве проб (фиг. 182 и 183). Этот метод удобен для контроля листов железа на равномерность в отдельных местах и для суждения о качестве литья.

Для измерения слабых полей до 80 $\frac{\text{амп. вит.}}{cm}$ Фэге (Voege) [3]) сконструировал простой, легко обслуживаемый аппарат.

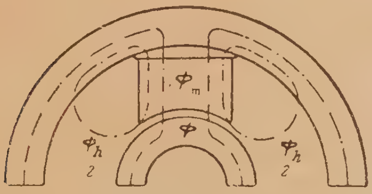
Применяя две неподвижных и одну подвижную катушку, обтекаемую постоянным током, в соединении с дифференциальным магнитометром, можно, по Кауфману [4]), при намагничивании переменным током получить изменение индукции B_t в зависимости от времени t и, соответственно, от тока J_t (см. также § 13).

1) ETZ. 381 (1891).
2) ETZ. 314 (1902).
3) ETZ. 871 (1909).
4) Verh. d. d. phys. Ges. 42 (1899).

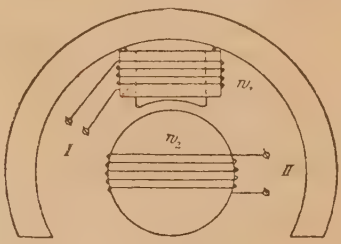
10. Определение коэффициента рассеяния.

В железном корпусе динамомашины (фиг. 184), вследствие магнитодвижущей силы, в полюсе возникает силовой поток, который замыкается через воздушный зазор между полюсом и якорем, через железо якоря и ярмо. Воздух, окружающий корпус машины, представляет собой магнитное ответвление, через которое замыкается часть силовых

линий. Благодаря этому изо всех Φ_m силовых линий, возбужденных в полюсе, только часть Φ поступает в якорь и послужит для возбуждения эл. дв. силы в якоре. Разность $\Phi_m - \Phi = \Phi_h$ представляет собой те линии, которые потеряны для индуктированной эл. дв. силы. Их называют линиями рассеяния и само явление—рассеянием. Для логарифмического вычисления, однако, удобнее пользоваться вместо разности $\Phi_m - \Phi$,—коэффициентом $\frac{\Phi_m}{\Phi} = \sigma$, где величину σ называют коэффициентом рассеяния рассматриваемого типа машины; она, конечно,



Фиг. 184.



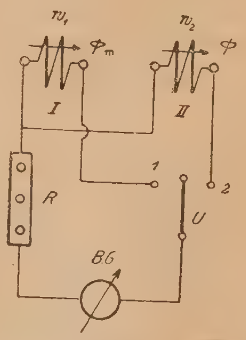
Фиг. 185.

больше единицы. Однако этот коэффициент отнюдь не постоянен, он изменяется вместе с индукцией в железе.

Поэтому коэффициент рассеяния у динамомашин следует определять при различных силах тока в якоре, как f (σ, J), так как поле машины изменяется с нагрузкой.

Для измерения σ, согласно определяющему его уравнению, нужно только узнать величину полей Φ_m и Φ. Лучше всего для этого подходит баллистический метод. Вокруг обмотки полюса, а равным образом и якоря, наматываем вспомогательные катушки I и II из нескольких витков (фиг. 185); в них при возникновении и исчезновении силового потока будут индуктироваться эл. дв. силы. Клеммы катушек соединяют через переключатель U с баллистическим гальванометром (фиг. 186) через регулируемое сопротивление R. При исчезновении поля для катушки I из w_1 витков получим отклонение гальванометра s_1. Это отклонение связано с величиной поля Φ_m следующим простым уравнением

$$\Phi_m = c \cdot \frac{R_1}{w_1} \cdot s_1 .$$



Фиг. 186.

Переводим переключатель U на контакт 2, при исчезновении поля в катушке II из w_2 витков гальванометр покажет отклонение s_2, и следовательно как и раньше

$$\Phi = c \cdot \frac{R_2}{w_2} \cdot s_2 .$$

Здесь R_1 и R_2 обозначают полное сопротивление цепи I и II. Разделив одно уравнение на другое имеем:

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{s_1}{s_2} \text{ или}$$

если взять $R_1 = R_2$ и $w_1 = w_2$, то

$$\sigma = \frac{s_1}{s_2}.$$

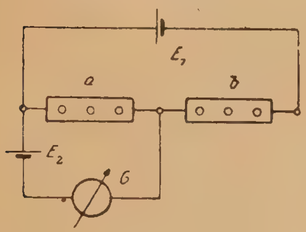
В многополюсных машинах вспомогательная катушка якоря должна охватывать одно полюсное деление и лежать в нейтральной зоне.

Вместо того, чтобы сравнивать между собою поля по их баллистическому действию, можно по Ротту (Rotth) [1]) определять компенсационным способом эл. дв. силы

$$E_1 = c \cdot w_1 \cdot \Phi_m \quad \text{и} \quad E_2 = c \cdot w_2 \cdot \Phi,$$

вызываемые ими, для чего пользуются, по Боша (Bosscha), следующей схемой (фиг. 187):

Установив правильную полярность катушки *I* (бо́льшая эл. дв. сила E_1) ее соединяют с очень большим сопротивлением $a + b$, а катушку *II* включают с гальванометром в компенсирующую ветвь. Затем устанавливают ползушку так, что при выключении гальванометр *G* не показывает отклонения поля. Тогда, пренебрегая сопротивлением катушек и соединительных проводов, получим отношение



Фиг. 187.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{a + b}{a},$$

из чего следует

$$\frac{w_1 \cdot \Phi_m}{w_2 \cdot \Phi} = \frac{w_1}{w_2} \cdot \sigma = \frac{a + b}{a}$$

или

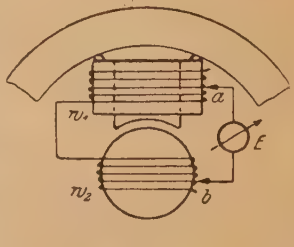
$$\sigma = \frac{a + b}{a} \cdot \frac{w_2}{w_1},$$

если $w_1 = w_2$, то

$$\sigma = \frac{a + b}{a}.$$

Точное нулевое положение гальванометра за всё время разряда редко достижимо: вследствие убывания поля, коэффициент рассеяния изменяется и потому изменяется отношение эл. дв. сил. Ввиду этого следят только за тем, чтобы гальванометр оставался в покое в момент выключения.

Описанный в § 9 метод Гольдшмидта также может быть использован для измерения рассеяния. Для этой цели наматывают вокруг обмотки магнита (фиг. 188) и якоря несколько витков проволоки и замыкают их через чувствительный вольтметр *E* так, чтобы их эл. дв. силы были включены навстречу. Теперь, если установить контактные иголки *ab* так, чтобы при выключении поля вольтметр



Фиг. 188.

не показал отклонения, то, при числе витков w_1 и w_2 вспомогательной цепи, будем иметь

$$\frac{\Phi_m}{\Phi} = \sigma = \frac{w_1}{w_2}.$$

Этот метод можно применять для центрирования якоря динамомашины постоянного тока (особенно при параллельном соединении) и для определения размагничивающих витков якоря.

Сводка нескольких удобных методов определения коэффициента рассеяния сделана Полем (R. Pohl) [2].

---

[1]) ETZ. 654 (1902).
[2]) Ecl. El. 93 (1907;) Ann. a. El. 354 (1907) (рефер.).

---

11. Прибор для практического измерения гистерезиса.

Описанные до сих пор методы, хотя и позволяют снять петлю гистерезиса, однако для заводской практики они слишком сложны или не применимы вследствие ошибок, вызываемых внешними влияниями. Потому Юинг [1]) предложил простой аппарат для удобного измерения потерь на гистерезис. Аппарат работает следующим образом:

Между полюсами подковообразного постоянного магнита, монтированного на призмах и снабженного стрелкой, устанавливается, приспособленная для вращения, узкая пачка листового железа испытуемого сорта площадью 1,6 $\times$ 7,6 *cm*. Листовое железо замыкает, таким образом, магнитную цепь и при вращении испытывает перемагничивание. Благодаря потреблению работы на перемагничивание, на постоянный магнит действует некоторый вращающий момент, так как при каждом полуобороте пачки железа притягивающая сила одного полюса магнита больше отталкивающей силы другого полюса. Величина, показываемая стрелкой магнита на шкале, и есть мера потерь на гистерезис в испытуемой пробе железа.

Для градуирования прибора пользуются пробой нормального листового железа с известной потерей, отклонения для него наносят графически, как абсциссы кривой, а соответствующие потери на гистерезис, как ординаты. Если A—потеря работы в эрг./*cm.* за один период, то

$$M_d \cdot \omega = A \cdot \nu \text{ эрг./сек. на } 1 \ cm^3.$$

Подставим в это уравнение значения для

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

и для числа периодов

$$\nu = \frac{n}{60}$$

(при двух полюсах), тогда вращающий момент будет

$$M_d = \frac{A}{2\pi} = c \cdot \alpha \text{ эгр.}/cm^3$$

т.-е. угол поворота α не зависит от числа оборотов, пока последнее не столь велико, чтобы индуктировать заметные токи Фуко.

На подобном же принципе основан измеритель гистерезиса Блонделя (Blondel) фирмы Carpentier [2]). В нем вокруг вертикальной оси вращается подковообразный магнит, испытуемая же проба, в форме маленького кольца или узкой прямоугольной пачки, может вращаться на вертикальной оси, которую поддерживает в определенном положении спиральная пружина. Если при вращении в одном направлении получим угол отклонения α_1, а в противоположном α_2, то работа гистерезиса будет

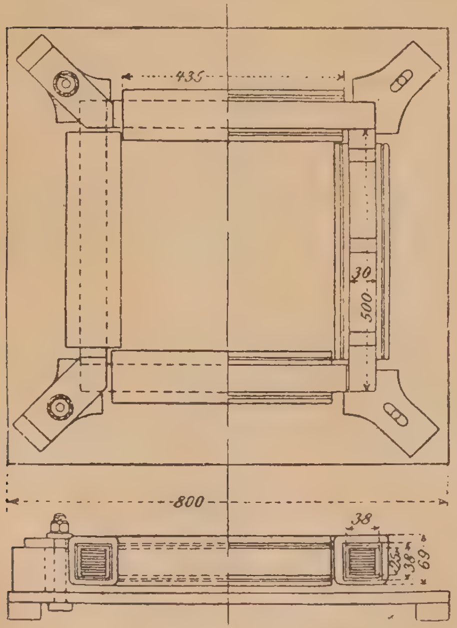
$$A = 2\pi \cdot c \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \text{ эрг.}/cm^3.$$

Если определить посредством наблюдения коэффициент кручения пружины c в единицах *cgs* (эрг. на 1° отклонения), то можно с помощью аппарата производить и абсолютные измерения. Для контроля служит эталонная проба.

[1]) ETZ. 292 (1895); El 26. April (1895).
[2]) ETZ. 178 (1899); Zfl. 259 (1899).

12. Практическое испытание железа прибором Эпштейна.

Рассмотренные выше способы, называемые магнитостатическими, служат только для того, чтобы определять статическую кривую намагничивания или магнитной проницаемости, а также качества железа по отношению к гистерезису, при этом потери на токи Фуко не измеряются. Однако в заводской практике для рассчетов инженера имеет большое значение динамическое намагничивание—переменным током, а также потери на гистерезис и токи Фуко.

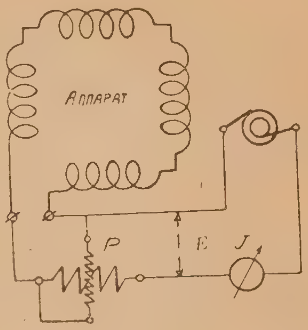


Фиг. 189.

Для этих измерений очень удобен аппарат Эпштейна. Его конструкция (фиг. 189) следующая: на деревянной доске установлены и соединены деревянными же зажимами четыре пачки листового железа,—в виде сторон квадрата. Размеры указаны на чертеже. Листовое железо для сердечников берется, не меньше чем из четырех различных листов и режется на пластины 500×30 *mm*. Последние прокладываются папиросной бумагой и складываются в пачки. При этом пластины не должны нигде касаться одна другой. Минимальный вес каждого сердечника—$2^1/_2$ *kg*. После прессования в тисках четыре сердечника обертываются тонкой изоляционной лентой и соединяются в магнитную цепь, на стыках их прокладывают прессшпаном толщиной 0,15 *mm*. Сверх каждого сердечника надета трубка из прессшпана 38×38 *mm* в сечении и 435 *mm* длиной. На каждую трубку равномерно навито 150 витков медной проволоки сечением 14 mm^2 (два параллельные канта 2×3,5 *mm*).

Вследствие равномерного намагничивания рассеяние в приборе понижено до незначительной величины.

Четыре катушки соединяют последовательно, присоединяют, согласно схеме (фиг. 190), амперметр, вольтметр и уаттметр, и всю установку включают к источнику переменного тока. Последний должен быть не слишком малой мощности, чтобы искажение кривой напряжения, возможное при включении прибора, содержащего железо, оставалось постоянным при различных силах тока.



Фиг. 190.

Согласно нормам германского союза электротехников [1]) суммарные потери на 1 *kg* железа должны быть определены при индукции $B_{\max} = 10000$ и 15000 гауссов, частоте

$\nu = 50 \frac{\text{пер.}}{\text{сек.}}$, и при температуре $\vartheta = 20°$C. Эта

цифра потерь, отнесенная к синусоидальной форме кривой напряжения, называется „удельными потерями“ (V_{10} и V_{15}).

Обозначим:

w—число витков прибора,

F—сечение железа одного сердечника,

ν—число периодов переменного тока,

f_e—формфактор кривой напряжения при опыте,

$B_{\max}$—амплитуда индукции в железе.

Индукция $B_{\max}$ зависит от эл. дв. силы E, именно

$$E = 4 \cdot f_e \cdot \nu \cdot w \cdot F \cdot B_{\max} \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

По этой формуле, если предварительно определить каким-нибудь способом формфактор $f_e = \frac{E}{E_{\text{сред}}}$, можно подсчитать эл. дв. силу E, соответствующую заданному $B_{\max}$. Сечение F лучше всего определить из веса G четырех сердечников, их длины l и удельного веса γ испытуемого железа. Если не было произведено специального измерения, то можно принять $\gamma = 7{,}7$ для динамного листового железа и 7,5 для трансформаторного железа. Измерение производится следующим порядком:

Из предварительного опыта при напряжении на клеммах $E'_k = E'$, подсчитанном для $B_{\max} = 10000$ гауссов, и при формфакторе $f'_e = 1{,}11$ определяют мощность P', ток J' и вид кривой напряжения, на основании чего получают значения

$$\cos\varphi' = \frac{P'}{E'_k \cdot J'}$$

и формфактора f_e.

Затем подсчитывают (сравн. фиг. 192) требуемое напряжение на клеммах

$$E_k \cong E + J' \cdot r \cdot \cos\varphi',$$

где E определено для истинного формфактора f_e, и $J' \cdot r \cdot \cos\varphi'$ есть уаттная составляющая потери напряжения в сопротивлении r намагничивающей катушки. При этом напряжении E_k, измеренном непо-

средственно на клеммах катушки (оно лишь немного отличается от E_k'), повторяют измерение и находят силу тока J, мощность P и $\cos\varphi$. Каким образом использовать эти данные для получения окончательного результата, мы покажем на цифровом примере.

При испытании получено:

$$E_k = 95\ \mathrm{V} \quad J = 4{,}21\ \mathrm{A} \quad P = 44\ \mathrm{W}$$
$$r = 0{,}16\ \Omega \quad F = 7{,}0\ cm^2 \quad l = 200\ cm$$
$$G = 10{,}8\ kg \quad f_{e\,1} = 1{,}13 \quad \nu = 60\ \text{пер/сек} \quad \vartheta' = 34^\circ\mathrm{C}$$
$$\cos\varphi = \frac{P}{E_k \cdot J} = \frac{44}{95 \cdot 4{,}21} = 0{,}11\,.$$

$R_s = 3200\,\Omega$ сопротивление вольтметра.

$R_{sl} = 5400\,\Omega$ сопротивление катушки напряжения уаттметра.

Ток J_o, проходящий через намагничивающую катушку, получим посредством геометрического вычитания токов, протекающих в R_s и R_{sl} (фиг. 191).

$$J_s = \frac{E_k}{R_s} = \frac{95}{3200} = 0{,}029\ \mathrm{A}\,,$$

и

$$J_{sl} = \frac{E_k}{R_{sl}} = \frac{95}{5400} = 0{,}017\ \mathrm{A}\,,$$

которые можно считать точно в фазе E_k. Для этого строим треугольник abd из $ab = J_{sl} + J_{sl}$, $ad = J$ и $\sphericalangle\varphi = \sphericalangle bad$. Точку d можно также определить отложив $ac = J \cdot \cos\varphi$ и опустив из c перпендикуляр до пересечения с окружностью, описанной из a радиусом J. Аналитически имеем:

$$J_o = \sqrt{J^2 + (J_s + J_{sl})^2 - 2 \cdot J \cdot (J_s + J_{sl}) \cdot \cos\varphi}$$

или после развертывания по формуле бинома и упрощения

$$J_o \cong J - (J_s + J_{sl}) \cdot \cos\varphi + \frac{(J_s + J_{sl})^2}{2J} \cdot (1 - \cos^2\varphi)$$

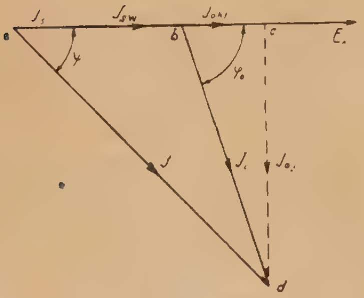


Рис. 191.

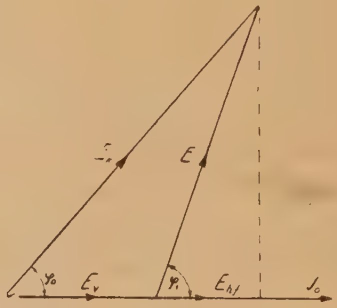


Рис. 192.

и в числах

$$J_o \cong 4{,}21 - 0{,}005 + 0{,}000025 = 4{,}205\,.$$

Поэтому, при практическом испытании, эта поправка не нужна, пока $J_s + J_{sl} \ll J$. Электродвижущ. сила E, соответствующая индукции B_{max}, подсчитывается, согласно фиг 192, из уравнения

$$E = \sqrt{E_k^2 + E_v^2 - 2 \cdot E_k \cdot E_v \cdot \cos\varphi_o}\,,$$

а так как потеря напряжения в катушке $E_v = J_o \cdot r = 4{,}205 \cdot 0{,}16 = 0{,}76$ V относительно мала и φ_o велико, то можно принять

$$E \cong E_k - E_v \cdot \cos\varphi_o\,.$$

Если P_n — потребленная аппаратом мощность, то

$$\cos\varphi_o = \frac{P_n}{E_k \cdot J_o}\,.$$

P_n находят, введя поправку на мощности потребленные в R_s и R_{sl}

$$P_n = P - \frac{E^2_k}{R_s} - \frac{E^2_k}{R_{sl}} = 44 - \frac{95^2}{3200} - \frac{95^2}{5400} = 39{,}5\text{ W}\,,$$

и

$$\cos\varphi_o = \frac{39{,}5}{95 \cdot 4{,}205} = 0{,}099\,.$$

Итак $E \cong 95 - 0{,}67 \cdot 0{,}099 = 94{,}93\ V$, то-есть практически можно принять $E = E_k$.

Из этого следует

$$B_{max} = \frac{E \cdot 10^6}{4 \cdot f_{e_1} \cdot \nu \cdot w \cdot F} = \frac{94{,}93 \cdot 10^8}{4 \cdot 1{,}13 \cdot 50 \cdot 600 \cdot 7} = 9920 \text{ гауссов}\,,$$

т.-е. только на 0,8% меньше, чем требуется по условию. Далее мощность, потребленная в железе

$P'_o = P_n - J^2_o \cdot r = 39{,}5 - 2{,}84 = 36{,}66$ W. Откуда „удельные потери“ будут

$$V'_{10} = \frac{P'_\delta}{G} = \frac{36{,}66}{10{,}8} = 3{,}4\ \text{W}/kg \text{ при } \vartheta' = 34°\text{C}.$$

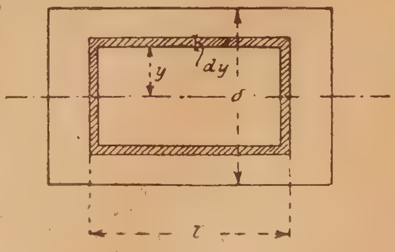
Согласно „нормам для испытания листового железа“ эта цифра должна быть отнесена к $\vartheta = 20°$C, поэтому нужно ввести поправку. Температура особенно влияет на потери на токи Фуко, т.-е. на второй член уравнения Штейнмеца (Steinmetz) [3])

$$P_o = P_h + P_f = (\eta_h \cdot \nu \cdot B_{max}^{1{,}6} + \xi \cdot \nu^2 \cdot B_{max}) \cdot V \cdot 10^{-7}\text{ W}$$

выражающего суммарные потери. Это влияние обусловлено тем, что электрическое сопротивление железа возрастает с повышением температуры, отчего P_f становится меньше.

Каким образом изменяется P_f в зависимости от температуры, показывает формула, полученная на основании следующих соображений:

Представим себе одну тонкую пластину железа толщиной δ *cm*, через которую, перпендикулярно к плоскости рисунка, проходит магнитный силовой поток, с одинаковой повсюду индукцией B_{max} — гауссов. Этим потоком будут возбуждены эл. дв. силы, которые действуют по замкнутым путям в железе. Выделим отсюда (фиг. 193) нить тока прямоугольной формы толщиной dy и длиной l, проходящую на расстоянии y от средней линии пластины. Площадь, охватываемая нитью тока, будет $F = l \cdot y$ и индуктированная в ней электродвиж. сила (в единицах $c \cdot g \cdot s$)



Фиг. 193.

$$dE = 4 \cdot f_e \cdot \nu \cdot F \cdot B_{max} = 4 \cdot f_e \cdot \nu \cdot l \cdot y \cdot B_{max}\,.$$

Электрическое сопротивление пути тока в абсолютных единицах

$$dR = \frac{(l+2y)\cdot\rho\cdot(1+\alpha\cdot\vartheta)\cdot 10^5}{b\cdot dy},$$

где b—толщина, измеренная в направлении силового потока, и ρ—удельное сопротивление в Ω при 0°C для 1 m/mm^2 ($1\ \Omega\ m/mm^2 = \frac{10^9}{10^2\cdot 10^2} = 10^5$ абс. ед. cm/cm^2). Отсюда можем, пренебрегая $2y$, вычислить потерю мощностью

$$dP_f = \frac{(dE)^2}{dR} = \frac{16\cdot f^2_e\cdot\nu^2\cdot B^2_{max}\cdot l\cdot b\cdot y^2\cdot dy}{\rho\cdot(1+\alpha\cdot\vartheta)\cdot 10^5}$$

или для всей пластины, если δ измерена в mm.

$$P_f = \frac{16\cdot f^2_e\cdot\nu^2\cdot B^2_{max}\cdot l\cdot b}{\rho\cdot(1+\alpha\cdot\vartheta)\cdot 10^5}\int\limits_{-\frac{\delta}{2}}^{+\frac{\delta}{2}} y^2\cdot dy$$

$$= \frac{4}{3}\cdot\frac{f^2_e\cdot\nu^2\cdot B^2_{max}\cdot l\cdot b\cdot\delta^3\cdot 10^{-8}}{\rho\cdot(1+\alpha\cdot\vartheta)}\ \text{эрг/сек}.$$

Потери на токи Фуко следовательно пропорциональны $(f_e\cdot B_{max})^2$ Подставив еще вместо $l\cdot b\cdot\frac{\delta}{10}$ об'ем в cm^3 получим:

$$P_f = \frac{4}{3}\cdot\frac{f^2_e\cdot\delta^2\cdot\nu^2}{\rho\cdot(1+\alpha\cdot\vartheta)}\cdot B^2_{max}\cdot V\cdot 10^{-7} = \xi\cdot\nu^2\cdot B^2_{max}\cdot$$

$$\cdot V\cdot\text{эрг/сек} = \xi\cdot\nu^2\cdot B^2_{max}\cdot V\cdot 10^{-7}\ W,$$

где $\xi = \frac{4}{3}\cdot\frac{f^2_e}{\rho\cdot(1+\alpha\cdot\vartheta)}\cdot\delta^2\cdot 10^{-7}$ эрг/сек для $\nu=1$ пер/секунд и $B_{max} = 1$ гаусс.

Коэффициент ξ зависит, как видим, от температуры ϑ, α обозначает температурный коэффициент железа. Если P_{f_1} и P_{f_2}—потери при температуре ϑ_1 и ϑ_2, то между ними будет иметь место отношение

$$\frac{P_{f_1}}{P_{f_2}} = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{1+\alpha\cdot\vartheta_2}{1+\alpha\cdot\vartheta_1}$$

$$P_{f_1} = P_{f_2}\cdot\frac{1+\alpha\cdot\vartheta_2}{1+\alpha\cdot\vartheta_1}.$$

Для разделения потерь в железе на потери—на гистерезис P_h и на токи Фуко P_f возьмем суммарные потери P_{hf}, при $B_{max}\cong 10000$, при различном числе периодов ν, и по возможности при постоянной температуре ϑ. Если теперь посредством деления на соответствующее число периодов, образуем отношение $A = \frac{P_{hf}}{\nu}$ и представим графически зависимость $f(A, \nu)$, то получим прямую.

Если же температура повысилась, то кривая при повышении числа периодов загнется вниз, так как P_f станет относительно меньше, чем при постоянной температуре. В этом случае через низшую точку проведем прямую, касательную к началу кривой.

Теперь при $B_{max} = \text{const}$, частное

$A = \frac{P_{hf}}{\nu} = \frac{P_h}{\nu} + \frac{P_f}{\nu} = h + w \cdot \nu$ представляет собой уравнение прямой, отсекающей на оси ординат отрезок $h = \frac{P_h}{\nu}$; этот отрезок представляет собой потери на гистерезис за один период, так как для $\nu = 0$ и $\frac{P}{\nu} = 0$. Здесь $h = \eta_h \cdot B^{1,6}_{max} \cdot V \cdot 10^{-7}$ W/пер и $w = \xi \cdot B^2_{max} \cdot V \cdot 10^{-7}$ W/пер, откуда можно вычислить η_h и ξ.

Поясним это на примере:

Для определенного сорта железа при постоянной температуре $\vartheta = 34°C$ ($\gamma = 7,61$ g/cm^3) были получены данные, приведенные в таблице:

B_{max}	ν	E_k	J	P_h	$J^2 . r$	P_{hf}	$A = \frac{P_{hf}}{\nu}$	
10000 = const	50	113,10	2,61	82,8	1,70	81,10	8,42	уатт/пер на 100 kg
	40	90,65	2,58	60,7	1,65	59,05	7,66	
	35	79,50	2,58	50,7	1,65	49,10	7,27	
	30	68,10	2,52	41,3	1,56	39,79	6,88	
	25	56,65	2,50	32,5	1,50	31,00	6,45	
	20	45,35	2,42	24,6	1,44	23,16	6,00	
наблюдено					**вычислено**			

Прямая, построенная по данным подсчета $f(A, \nu)$ на фиг. 194 дает в пересечении с осью ординат

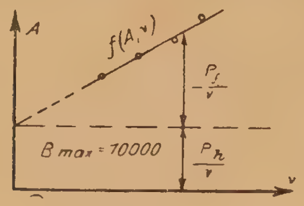
$$h = \frac{P_h}{\nu} = 4,38 \text{ W/пер для } 100 \ kg .$$

Для $\nu = 50$ получаем

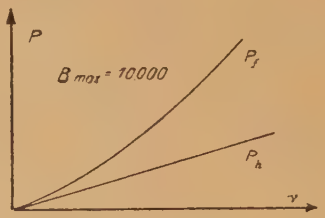
$$w \cdot \nu = \frac{P_f}{\nu} = 8,46 - 4,38 = 4,08 \text{ W/пер на } 100 \ kg .$$

Если умножим значение h и $w \cdot \nu$ на различные числа периодов, то получим зависимость P_h и P_f от числа периодов при температуре $\vartheta = 34°C$ (фиг. 195).

Поступая таким же образом для различных индукций B_{max} получим ряд кривых, по которым можем определить зависимость потерь



Фиг. 194



Фиг. 195

(на 100 *kg*) от индукции при постоянном числе периодов ν, именно $f(P_h, B_{max})$ и соответственно $f(P_f, B_{max})$.

Весу в 100 *kg* соответствует об'ем

$$V = \frac{G \cdot 1000}{\gamma}\, cm^3 = \frac{100 \cdot 1000}{7,61} = 13160\, cm^3,$$

откуда можем определить

$$\eta_h = \frac{h \cdot 10^7}{V \cdot B_{max}^{1,6}} = \frac{4,38 \cdot 10^7}{13160 \cdot 10^{6,4}} = 1,33 \cdot 10^{-3}\ \text{эрг}/cm_3 .$$

и

$$\xi = \frac{w \cdot 10^7}{V \cdot B_{max}^2} = \frac{4,08 \cdot 10^7}{50 \cdot 13160 \cdot 10^8} = 6,22 \cdot 10^{-7}\ \text{эрг}/cm^3 .$$

По этому методу разделим теперь потери в железе (стр. 205) $P'_o = P_h + P'_f = 36,66$ W на $P_h = 19,30$ W и $P'_f = 17,36$ W. Имеем

$$P_f = P'_f \frac{1 + \alpha \cdot \vartheta'}{1 + \alpha \cdot \vartheta}$$

и

$$P''_o = P_h + P'_f \frac{1 + \alpha \cdot \vartheta'}{1 + \alpha \cdot \vartheta} = P'_o - P'_f + P'_f \frac{1 + \alpha \cdot \vartheta'}{1 + \alpha \cdot \vartheta}$$

или

$$P''_o = P'_o + P'_f \cdot \frac{\alpha \cdot (\vartheta' - \vartheta)}{1 + \alpha \cdot \vartheta} .$$

Подставив $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3}$ и $\vartheta = 20°$, получим

$$P''_o = P'_o + 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot P'_f \cdot (\vartheta' - 20) = 36,66 + 0,99 = 37,65\ \text{W},$$

$$P_f = 18,35\ \text{W} .$$

Откуда удельные потери

$$V''_{10} = \frac{P''_o}{G} = \frac{37,65}{10,8} = 3,5\ \text{W}/kg \text{ при } \vartheta = 20°\text{C} .$$

Вторая поправка нужна в виду того, что мощность P_1 измерена для индукции B_1, в то время как истинная мощность P_o должна быть определена при индукции B. Разность $b = B - B_1$ однако, так мала, что истинную мощность

$$P_o = [\eta_h \cdot \nu \cdot (B_1 + b)^{1,6} + \xi \cdot \nu^2 \cdot (B_1 + b)^2] \cdot V \cdot 10^{-7}$$

или

$$P_o = \left[\eta_h \cdot \nu \cdot B_1^{1,6} \left(1 + \frac{b}{B_1}\right)^{1,6} + \xi \cdot \nu^2 \cdot B_1^2 \cdot \left(1 + \frac{b}{B_1}\right)^2 \right] \cdot V \cdot 10^{-7}$$

после развертывания по формуле бинома найдем, приняв во внимание только линейные члены

$$P_o = (\eta_h \cdot \nu \cdot B_1^{1,6} + \xi \cdot \nu^2 \cdot B_1^2 + 1,6\,\frac{b}{B_1} \cdot \eta_h \cdot \nu \cdot B_1^{1,6} + 2\,\frac{b}{B_1} \cdot \xi \cdot$$

$$\cdot\, \nu^2 \cdot B_1^2) \cdot V \cdot 10^{-7}.$$

Оба первые члены соответствуют P_1, третий и четвертый—поправке. Потому

$$P_o = P_{h\,1} \cdot \left(1 + 1,6 \cdot \frac{b}{B_1}\right) + B_{f1} \cdot \left(1 + \frac{2\,b}{B_1}\right).$$

В нашем примере $B_1 = 9920$ гауссов, откуда $b = 80$ и

$$P_o = 19,3 \cdot \left(1 + 1,6 \cdot \frac{8}{992}\right) + 18,35 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{8}{992}\right)$$

или

$$P_o = 19,55 + 18,65 = 38,20 \text{ W},$$

из чего следует:

$$V_{10} = \frac{P_o}{G} = \frac{38,20}{10,8} = 3,54 \text{ W}/kg \text{ при } B_{\max} = 10000 \text{ гауссов.}$$

Изменение числа периодов с ν на ν_1 при $B_{\max} = \text{const}$ дает измеренную мощность $P_1 = P_{h\,1} + P_{f\,1}$. А так как

$$P_h = \frac{\nu}{\nu_1} \cdot P_{h_1} \text{ и } P_f = \left(\frac{\nu}{\nu_1}\right)^2 \cdot P_{f1}.$$

то получим потребление мощности при ν периодах

$$P_h + P_f = P_o = \frac{\nu}{\nu_1} \cdot P_{h_1} + \left(\frac{\nu}{\nu_1}\right)^2 \cdot P_{f_1}.$$

Изменение формфактора f_e требует следующую поправку: как указано выше

$$P_f = c \cdot f_e^2 \quad \text{и} \quad P_f = P_{f_1} \cdot \left(\frac{f_e}{f_{e_1}}\right)^2,$$

так что

$$P_o = P_{h1} + P_{f1} \cdot \left[\frac{f_e}{f_{e1}}\right]^2,$$

если P_{f_1} было получено при f_{e_1}.

В нашем примере $f_{e_1} = 1,13$ вместо $f_e = 1,11$ для синусоидальной формы.

Таким образом мы имеем

$$P_o = 19,55 + 18,65 \cdot \left(\frac{1,11}{1,13}\right)^2 = 19,55 + 18,0 = 37,55 \text{ W}$$

и $$V_{10} = \frac{37,55}{10,8} = 3,47 \text{ W}/kg \text{ при } \vartheta = 20°\text{C}; \; B_{\max} = 10000; \; f_e = 1,11.$$

Изменение формфактора на + 1.8% вызовет изменение удельных потерь на — 2%. Поэтому следует при испытании стремиться к синусоидальной форме кривой напряжения. По этой же причине следует поддерживать небольшую величину падения напряжения в главной цепи.

Согласно исследованиям аппарата Эпштейна, произведенным Гольце[4]), большое влияние на формфактор оказывает катушка тока электродинамического уаттметра. Поэтому, чтобы устранить эту ошибку, рекомендуется для измерения напряжения и мощности применять квадрантный электрометр, как это показал Шмидель[5]). Так как согласно нормам должно быть произведено также испытание железа на намагничивание, определена кривая f (B, H), то Эпштейн[6]), кроме разделения намагничивающей катушки, добавил в своем аппарате вспомогательную катушку сверху пачек железа. Эта обмотка служит для того, чтобы снимать с помощью баллистического гальванометра, при возбуждении постоянным током, статическую кривую намагничивания.

Против разделения выступили Гумлих и Роговский[7]) и показали на новой установке[8]), что посредством устройства плоской вспомогательной катушки между намагничивающей катушкой и железом можно таким же путем, как для способа магнитного перешейка (стр. 186), измерить силу поля в пачке железа и тем достичь абсолютного измерения магнитной проницаемости. Опыты Гольце[9]) с аппаратом, построенным Allg. Elektrizitäts-Ges., доказали простоту этого метода.

Применив метод сравнения коэффициентов взаимоиндукции (стр. 154, фиг. 152), Лонгхейзен (Longhuyzen)[10]) приложил баллистический нулевой метод для определения магнитной проницаемости железа с помощью нормальной пробы. Чтобы избежать затруднительных пересчетов при определении потерь в железе и тем сделать аппарат пригодным для неквалифицированного рабочего, в новой модели аппарата, изготовленной Siemens & Halske, применен специально сконструированный дифференциальный уаттметр[11]). Этим достигнута очень большая точность измерения, простота и скорость и, вместе с тем, устранены ошибки от влияния температуры, напряжения, индукции, частоты и формы кривой.

Подобный же метод предложен Ангерманном[12]).

Для испытания готовых железных тел, например, штампованных колец из листового железа, удобен аппарат Мэллингера[13]). В нем намагничивающая обмотка может быть скоро и просто надета на железное кольцо с помощью вилочных контактов. Преимущество способа, это—отсутствие стыков в магнитной цепи, однако индукция в железе распределена по сечению неравномерно. Если хотят испытать свойства листового железа, не разрезывая листы, то можно воспользоваться аппаратом, сконструированным Рихтером[14]). Опыты для сравнения этих трех аппаратов были произведены в PTR Гумлихом и Розе (Rose)[15]) и показали лишь небольшое расхождение результатов. Ими же[16]) сравнено между собой намагничивание при постоянном и переменном токе, при чем доказано, что формула Штейнмеца для индукций до $B_{max} = 12000$ требует незначительного изменения, и что, вследствие вязкости материала, статистическая и динамическая кривые намагничивания не совпадают.

Для испытания пачек листового железа без замкнутой магнитной цепи Битти (Beattie)[17]) дал следующий способ; он определяет по-

тери посредством измерения суммы и разности напряжений вторичной катушки и введенного в первичную цепь безиндукционного сопротивления. Хунд (Hund)[18]) определяет индукцию и кривую намагничивания сравнением, с помощью дифференциального трансформатора, самоиндукции катушки, содержащей железное тело с известной самоиндукцией.

Вращающееся перемагничивание дает, согласно Герману (Hermann)[19]), такие же потери, как и линейное.

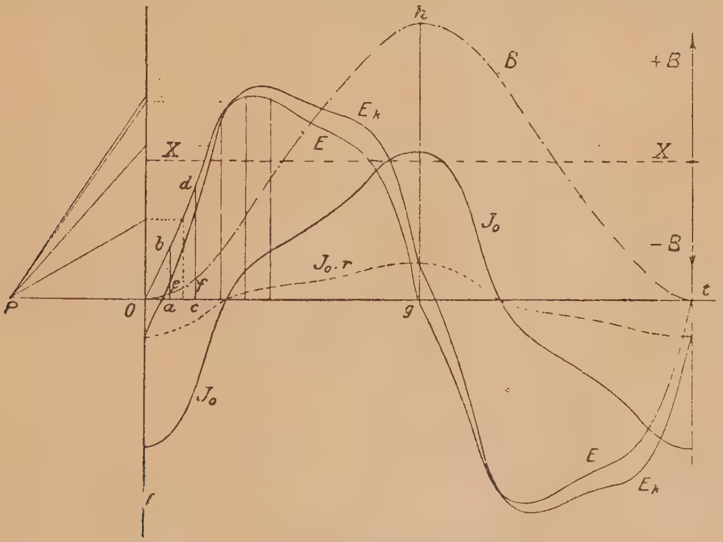
[1]) ETZ. 303 (1900); 684 (1903). [2]) ETZ. 512 (1914).
[3]) Richter предлагает [ETZ. 1241 (1910)]:

$$W_0 = a \cdot B_{max} + (b+c) \cdot B^2_{max};$$

сравн. также AFE. (6) 437 (1918).
[4]) ETZ. 967 (1913). [5]) ETZ. 370 (1912).
[6]) ETZ. 334, 363 (1911). [7]) ETZ. 613, 1314 (1911).
[8]) ETZ. 262, 1180 (1912); 146, 147 (1913).
[9]) AfE. 148 (1913); ETZ. 474 (1914).
[10]) ETZ. 1131 (1911). [11]) ETZ. 531 (1912).
[12]) ETZ. 631, 669 (1912). [13]) ETZ. 379 (1901).
[14]) ETZ. 491 (1902); 341 (1903). [15]) ETZ. 403 (1905).
[16]) ETZ. 503 (1905); Wiss. Abh. d. PTR 207 (1905).
[17]) El. 6.11 (1908); El. u. M. Wien 1156 (1908).
[18]) El. u. M. Wien (35) 53; ETZ. 22 (1919).) [19]) ETZ. 363 (1910).

13. Снятие переменным током характеристических кривых железа.

Это измерение делается в дополнение к испытанию железа, описанному в § 12, так что для него можно сохранить включение ф. 190. Нужно только еще включить перед аппаратом безиндукционное сопротивление R, которое в соединении с контактным прибором позво-



Фиг. 196.

ляет кроме кривой напряжения $f(E_{kt}, t)$ снять кривую тока $f(J_{ot}, t)$. (R не должно быть большим, иначе изменится форма кривой тока).

Обе кривые изображены на фиг. 196. Умножив мгновенные значения J_{ot} на сопротивление r намагничивающей катушки, получим кривую потери напряжения $f\,(J_{ot} \cdot r,\ t)$ в масштабе E_k, ординаты которой нужно отнять от $f\,(E_{kt},\ t)$. Таким образом найдем кривую эл.-дв. силы $f\,(E_t,\ t)$, из которой можно получить кривую индукции $f\,(B_t,\ t)$ след. образом.

По закону индукции Фарадея-Максвелла для нашей установки имеет место уравнение:

$$\int_0^{\frac{T}{2}} E_t \cdot dt = w \cdot \nu . F . \vartheta . 10^{-8} \cdot \int_{-B_{\max}}^{+B_{\max}} dB = w \cdot \nu \cdot F \cdot 10^{-8} \cdot 2\,B_{\max}.$$

Следовательно, кривая индукции есть интегральная кривая от $f\,(E_t,\ t)$. Обозначив площадь кривой эл.-дв. силы за половину периода через F_E *cm*² получим:

$$c \cdot F_E = w \cdot \nu \cdot F \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot B_{\max}$$

или

$$B_{\max} = \frac{c \cdot F_E \cdot 10^{-8}}{2 \cdot w \cdot \nu \cdot F} \text{ гауссов },$$

где масштаб c определяется *вольт. сек/cm²* по масштабам E_t и t (сравн. стр. 170).

Интегрирование может быть выполнено графически[1]). На оси абсцисс берут произвольный полюс P и делят плоскость ординатами ab, cd и т. д. на узкие полосы. Затем из P проводят лучи к проектированным на ось ординат конечным точкам средних ординат каждой полосы и параллельные первым лучам лучи oe, ef и т. д.

Если провести через этот ряд линий плавную непрерывную кривую, то получим $f\,(B_t,\ t)$. Наибольшая ордината gh есть мера площади F_E кривой эл.-дв. силы, действительно

$$F_E = gh \cdot PO\ .$$

Из чего следует

$$B_{\max} = \frac{c \cdot gh \cdot PO \cdot 10^{8}}{2w \cdot \nu \cdot F},$$

чем также определяется масштаб для ординат $f\,(B_t,\ t)$. Если отложить ординаты J_t, за соответствующие промежутки времени, как абсциссы, B_t (измеренное от линии XX, проведенной через середину gh) как ординаты в прямоугольной системе координат, то получим динамическую петлю гистерезиса.

Площадь этой петли представляет собой величину

$$\int_{-Jo\,\max}^{+Jo\,\max} dB \cdot J_{ot} = \int_{-Jo\,\max}^{+Jo\,\max} E_t \cdot dt \cdot J_{ot} = A\ ,$$

т.-е. работу затраченную на гистерезис и токи Фуко при перемагничивании током J_o, при напряжении E. По сравнению со статическими петлями гистерезиса, эти кривые несколько шире и закруглены на вершинах, так как, вследствие замедляющего действия токов Фуко, индукция B при возрастающей силе тока относительно меньше, а при убывающей силе тока относительно больше. Таким способом определяют большое число таких петель.

Другие методы для получения $f(B_t, t)$ предложены Кауфманном (стр. 198), Тоунсендом (Townsend) [2]) и Ляйлем (Lyle) [3]).

Чтобы построить по этим данным динамическую кривую намагничивания, мы должны принять во внимание, что она представляет собой зависимость индукции в железе B_{max} от силы поля H. Но

$$H = J_{os} \cdot \frac{w}{l},$$

где

$$J_{os} = J_o \cdot \sin\varphi_o = \frac{J_{o\,max}}{s_i} \cdot \sin\varphi_o = \sqrt{J_0^2 - \frac{P_o}{E_k}}$$

намагничивающая составляющая тока J_o (фиг. 196), с коэффициентом амплитуды кривой s_i, определяется из кривой и потребленной мощности.

Приняв за абсциссы значения силы поля H, наносят как ординаты значения B_{max}, соответствующим вершинам петли (в действительности $J_{o\,max}$ не вполне совпадает с B_{max}) и соединяя точки, получают динамическую кривую намагничивания. Индукцию B_{max} можно также определить по эл.-дв. силе E_2, индуктированной во вторичной катушке, навитой на железное тело, измеряя напряжение E_{k2} на клеммах этой катушки. Тогда

$$E_2 \cong E_{k2} + \frac{E_{k2}}{R_{v2}} \cdot r_2,$$

где R_{v2} обозначает сопротивление вольтметра и r_2 —сопротивление вторичной катушки.

Полученные таким путем кривые намагничивания отклоняются до 70% от статических кривых, как это показано в одной статье Брэгстэдом (Bragstad) и Лиска (Liska) [4]), в которой они, кроме того, дают метод определения по динамической кривой кривых намагничивания для основной волны и для высших гармонических. Для испытания железа при высокой частоте до 200.000 пер./сек. Александерсон (Alexanderson) [5]) предложил новый метод.

---

1) ZVI. 826 (1919).
2) Tr. AIEE. 5 (1901).
3) Phyl. Mag. 549 (1903); ZfI. 63 (1904) (рефер.).
4) ETZ. 713 (1908); 611 (1911).
5) ETZ. 1078 (1911).

---

14. Снятие кривых распределения поля электрических машин (полюсных диаграмм).

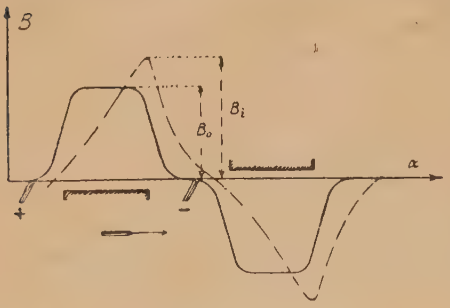
Кривые распределения поля $f(B,\alpha)$ дают зависимость индукции B вблизи от поверхности якоря от дуги α окружности якоря. Для определения их пользуются методами, которые дают возможность измерить индукцию B:

а) Висмутовой спиралью

(сравн. стр. 195).

Спираль укрепляют на подвижной ручке, которую можно передвигать по шайбе с делениями параллельно оси машины. Затем спираль

вводят в воздушный зазор между якорем и полюсным башмаком, при нормально возбужденной **стоящей** машине. Полученные из градуировочной кривой спирали значения B_0, для различных мест, т.-е. углов поворота α, наносят в зависимости от α, как это показано на фиг. 197. Кроме того, в том же масштабе определяется и наносится на диаграмму положение полюсов и место щеток, а также указывается направление вращения якоря. Подобным же образом снимается кривая поля одного якоря $f\ (B_я, \alpha)$; для этого пропускают, при невозбужденном поле, через неподвижный якорь ток $J_я$, соответствующий требуемой нагрузке. (Для самовозбуждающейся шунтовой машины $J_я = J + J_ш$). Если желают получить распределение поля в условиях нормальной работы с **нагруженным** якорем, то нужно сложить ординаты обеих кривых или снять **экспериментально** кривую поля при нагрузке $f\ (B_i, \alpha)$ (пунктир на фиг. 197). Для этого плотно закрепляют якорь при нормальном возбуждении и подводят к нему напряжение, равное потери напряжения $E_{пя}$ в якоре, это напряжение и даст требуемую силу тока в стоящем якоре.



Фиг. 197.

При измерении следует, по возможности, поддерживать ту температуру, для которой градуирована спираль.

b) Узкой испытательной катушкой.

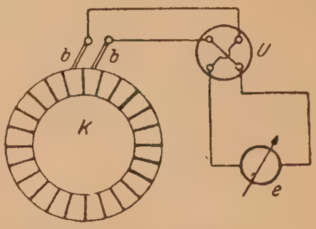
И в этом случае машина должна быть остановлена. Этот метод имеет то же преимущество, как и описанный в *a*), именно: можно делать исследования для тех положений щеток, при которых машина искрит. На подвижной ручке укрепляют тонкую ⌴-образную латунную пластинку; эта пластинка служит футляром для узкой (5—8 *mm*) испытательной катушки, длина этой катушки равна длине якоря. Если приключить катушку к градуированному баллистическому гальванометру и быстро вытащить ее из междужелезного пространства, то баллистическое отклонение s будет мерой для средней индукции B в полосе поля, занятой катушкой. Абсолютное значение можно подсчитать по величине этой полосы и числу витков катушки. Подобным же образом можно провести измерение для поля якоря с током без возбуждения и при полном возбуждении. **Морфи** (Morphy) и **Ошвальд** (Oschwald) [1]) определяют подобным же образом с помощью узкой испытательной катушки относительную плотность и направление поля.

Если хотят устранить влияние поля остаточного магнитизма на поле якоря, исследуемое при невозбужденных магнитах, то нужно при якоре без тока и невозбужденных магнитах снять кривую остаточного поля $f\ (B_{ост.}, \alpha)$ и ординаты этой кривой вычесть из ординат $f\ (B_я, \alpha)$. Вместо того, чтобы вытаскивать катушку из поля, можно, при широком воздушном зазоре, повернуть ее на 180°, что даст двойное отклонение $2s$. Третий метод состоит в том, что при различных положениях катушки выключают возбуждающий ток и измеряют получающийся при этом индукционный толчок. Вследствие реакции самоиндукции этот способ можно применять только для малых машин.

или же нужно принимать особые меры для защиты обмотки от пробивания (электролитические конденсаторы, большие сопротивления, включенные параллельно обмотке).

c) Двумя подвижными вспомогательными щетками.

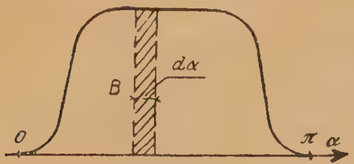
Две тонкие узкие щетки, желательно из твердой листовой меди (во избежание термоэлектрических сил), укреплены на передвижной ручке, которая может перемещаться по диску с делениями, так же, как при измерениях пунктов *a*) и *b*). Обе щетки соединены через переключатель *U* с вольтметром *e* (фиг. 198). Расстояние между щетками следует выбирать так, чтобы они касались одних и тех же частей поверхности тех пластин, которые сдвинуты одна от другой на шаг y_k коллектора. Шаг коллектора или расстояние между пластинами, к которым присоединены концы одной и той же катушки, различны в зависимости от рода обмотки. Так для петлевой и спиральной обмоток вспомогательные щетки нужно расставить на *m*-кратную ширину пластины (при *m*-кратной параллельной обмотке), а при волновой обмотке, при которой одна катушка включена между y_k пластинами или *p* катушек между *a* пластинами, в случае, если отношение $\frac{p}{a}$ (2*p* полюсов, 2*a* ветвей якоря) целое число нужно измерять напряжение между y_k пластинами (приближенно также между соседними); в случае же если $\frac{p}{a}$ — дробь, то вспомогательные щетки нужно расставлять на *a* пластин. В последнем случае собственно измеряют среднее значение всех составляющих поля, которые охватываются *p* катушками, кроме того, эти катушки лежат под различными полюсами, так что измеряют лишь среднюю силу поля *p* полюсов. Если пустить машину в ход при нормальном и постоянном возбуждении, то отдельные катушки в зависимости от их положения α (отнесенного к какому-либо начальному) по отношению к полю дадут различные эл.-дв. силы, из которых только соединенные с вспомогательными щетками будут действовать на вольтметр. Этот последний покажет отклонение, которое при сходе действовавшей в этот момент катушки, будет поддержано следующей. Если повернем ручку со щетками на некоторый угол, то получим эл.-дв. силу для другого положения α катушки в поле. Изображая отсчитанные значения *e*, как функцию от α, получим кривую распределения поля для холостого хода в масштабе напряжения. Таким же образом снимают кривые при различных токах нагрузки. Так как катушка проводит ток, то к измеренному напряжению следует прибавлять положительную или отрицательную потерю напряжения в катушке, в зависимости от того, одинакового ли или противоположного направления ток и эл.-дв. сила, индуктированная в измеряемой катушке якоря. Из снятых кривых видно искажение и сдвиг поля поперечным намагничиванием и ослабление размагничиванием.



Фиг. 198.

Площадь, замыкаемая кривой, есть мера силового потока *Φ* одного полюса.

Для узкой полоски (фиг. 199) шириной $d\alpha$ и высотой B площадь ее $B \cdot d\alpha$ есть силовой поток, входящий в якорь на 1 *cm* длины внутри угла $d\alpha$. Тогда для длины l якоря



Фиг. 199.

$$l \cdot B \cdot d\alpha = d\Phi$$

будет числом силовых линий для угла $d\alpha$; и для одного полюсного деления, отнесенного к двухполюсной машине

$$\int_0^\pi l \cdot B \cdot d\alpha = \int_0^\Phi d\Phi = \Phi \text{ максуэллей}$$

будет силовой поток от одного полюса в якорь. Если вынести l, как постоянную, за знак интеграла, то

$$\int_0^\pi B \cdot d\alpha$$

представит собой площадь F кривой, следовательно

$$\Phi = l \cdot F .$$

Площадь есть мера для Φ.

Чтобы исследовать влияние одного поперечного намагничения, нужно устранить влияние размагничивающего намагничения, для этого при нагрузке увеличивают возбуждение до тех пор, пока индуктированная в якоре эл.-дв. сила $E'_я$ станет равной эл.-дв. силе при холостом ходе, т.-е. нужно, чтобы

$$E_к = E_я \mp J_я \cdot (R_я + R_п) = e \mp J_я \cdot (R'_я + R_п)$$

где знак $+$ относится к мотору, $R_я$ сопротивление якоря и $R_п$ переходное сопротивление между коллектором и щетками.

Вообще нет необходимости вычерчивать кривые в масштабе индукций, так как в большинстве случаев (напр., для коэфф. полезного действия) нужно только отношение

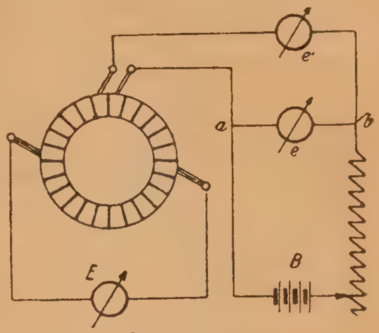
$$\frac{B_i}{B_o},$$

которое равно

$$\frac{e_i}{e_o}.$$

Если хотят получить не относительные, а **абсолютные** кривые $f(B, \alpha)$, то нужно при опыте принять во внимание, что прибор показывает не действительную эл.-дв. силу e, а несколько меньшую e'. Хотя эта ошибка мала, однако, она может повлиять на результат в случае толстых изоляционных прослоек между пластинами коллектора и низкого числа оборотов; причина ее в том, что при большой поверхности контакта вспомогательных щеток, индуктируемая катушка будет дважды замыкаться накоротко,—в случае узких вспомогательных щеток этого не будет, зато цепь тока измерительного прибора будет прерываться на короткие промежутки, так что прибор будет получать не ровный постоянный ток, для которого он градуирован, а пульсирующий, среднее значение которого e' он покажет. Во избежание этой ошибки прибор градуируют заранее для данного числа перерывов, с этой целью к двум точкам a b, напряжение e которых известно и легко регулируется, включают вольтметр последова-

тельно со вспомогательными щетками (фиг. 200), и графически изображают зависимость между показаниями прибора e' и напряжением e. При этом, чтобы устранить влияние эл.-дв. силы, индуктируемой в катушках полем остаточного магнитизма, возбуждают магниты в обратном направлении до тех пор, пока вольтметр, включенный на главные щетки, не покажет нуль.



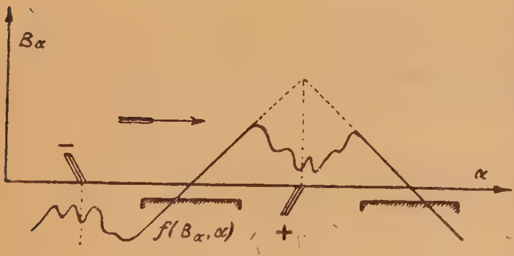
Фиг. 200.

Этот метод применим для точного определения силы поля только в том случае, когда якорь имеет обмотку по диаметру, т.-е. длина катушки равна полюсному делению. При обмотке по хорде, с сильно укороченным шагом, возможно только относительное измерение поля.

d) Вращающейся вспомогательной катушкой.

Для точного измерения следует навить на якорь вспомогательную катушку из нескольких витков, длина этой катушки должна быть равна длине полюса, концы ее нужно вывести к двум контактным кольцам. Эл.-дв. силы, появляющиеся при различных положениях катушки по отношению к полю, можно измерить посредством вращающегося контактного приспособления (шайба Жубера) и баллистического гальванометра.

Только этим способом можно точно определить распределение поля якоря; для этого последний вращают при невозбужденном поле и нормальной силе тока. Тогда якорь возбудит поле перпендикулярное по отношению к полю магнитов, но это неподвижное поле пересекает проводники якоря и вспомогательной катушки и вызывает в них эл.-дв. силу. Абсолютные значения e' и соответственно B можно определить посредством градуирования по способу фиг. 200. Диаграмма этого поля $f(B_я, \alpha)$ показывает мешкообразную форму кривой поля вокруг нейтральной зоны и мест контакта щеток (фиг. 201).



Фиг. 201.

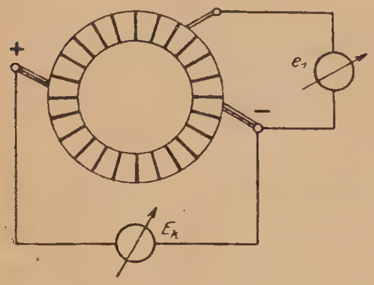
Если желают определить влияние на поле одного поперечного намагничения, то чтобы устранить влияние размагничения поступают как было описано в c).

e) Осциллографом.

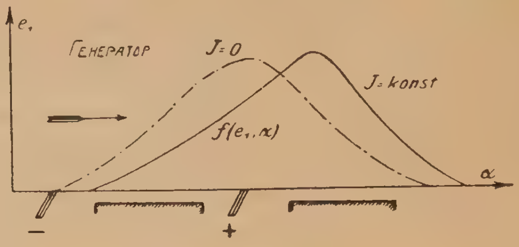
Описанную в d) вспомогательную катушку заставляют действовать на измерительную петельку осциллографа. Для установки на подходящее отклонение зеркальца служит добавочное сопротивление. Масштаб ординат находят посредством переключения измерительной системы при неизменном сопротивлении цепи к известному напряжению, тогда получают прямую параллельную оси абсцисс.

f) Из потенциальной кривой коллектора.

Если измерить вольтметром разность потенциалов e_1 между неподвижной главной щеткой и различными точками коллектора, по схеме (фиг. 202), то графическое изображение ее даст кривую



Фиг. 202.



Фиг. 203.

f (e_1 , α), которую называют **потенциальной** кривой коллектора (фиг. 203).

Разность между низшим и высшим значениями потенциалов равна напряжению на клеммах $E_к$. Нагрузочная кривая у генератора сдвинута в направлении вращения, у мотора же в обратном направлении. Сдвиг этой вызван реакцией якоря.

Ординаты кривой представляют собой сумму отдельных потенциалов $e_к$ коллектора между главной щеткой и точкой коллектора, соответствующей данной ординате. Если выразить графически отдельные потенциалы, как функцию окружности коллектора α, то получим так называемую **кривую коллектора** f ($e_к$, α). А так как

$$e_1 = \sum_0^{\alpha} e_к$$

или для бесконечно малого угла α можно

$$e_1 = \int_0^{\alpha} e_к \cdot d\alpha\,, \quad \text{то}$$

$$e_к = \frac{de_1}{d\alpha}$$

и кривая

$$f\,(e_к\,,\,\alpha) = f\left(\frac{de_1}{d\alpha}\,,\ \alpha\right).$$

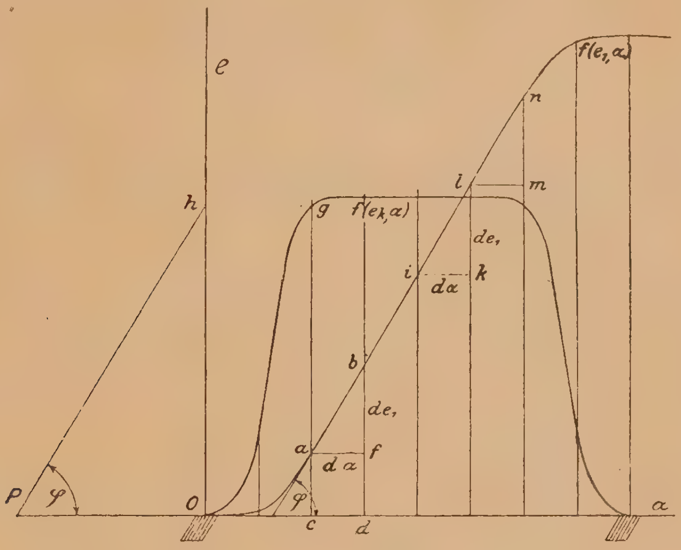
Итак кривая коллектора есть **дифференциальная кривая** потенциальной кривой и может быть построена из нее следующим геометрическим методом (фиг. 204), обратным методу, данному на фиг. 196. Площадь делят на узкие вертикальные площадки и проводят через концы ординат a b i l и т. д. касательные к кривой, тогда

$$tg\,\varphi = \frac{de_1}{da} = e_к\,.$$

Затем проводят из полюса P под углом φ луч Ph, тогда

$$Oh = PO \cdot tg\,\varphi = \text{const} \cdot tg\,\varphi = \text{const} \cdot e_\kappa .$$

Итак Oh является мерой для e_κ, и ее масштаб определяется дли-



Фиг. 204.

ной PO. Если теперь отложить $cg = Oh$ на ординате, проходящей через a, то g будет точкой искомой кривой $f\ (e_\kappa, \alpha)$.

Эту кривую также можно построить, проведя через точки a, b, i, l и т. д. горизонтали af, ik, lm и отложив от оси абсцисс разности ординат de_1, определяемые этими горизонталями, напр. fb, kl, mn и т. д., обязательное условие при этом—малая ширина cd.

Для получения по точкам дифференциальной кривой можно применять особый прибор Эрнеске (Ernecke) [2]) (так назыв. Spiegel-derivator).

Кривую коллектора $f\ (e_\kappa, \alpha)$ можно получить и непосредственно из опыта. Для этого определяют, с помощью описанных в c) вспомогательных щеток, разность потенциалов между двумя соседними пластинами. Этим же способом можно определить кривую поля, поэтому кривая коллектора выражает собою и кривую поля, по крайней мере для спиральных, петлевых и волновых обмоток (однако только при условии $\frac{p}{a}$ = целое число).

---

[1]) El. 583 (1912); ETZ. 462 (1912).
[2]) Phys. Z. 57 (1909) (Wagener); ZfJ. 122 (1909) (рефер.).

ОТДЕЛ III.

Получение и анализ кривых переменного тока.

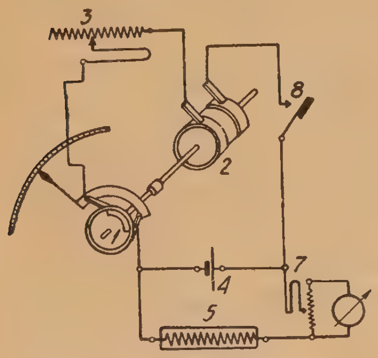
(Составлено доц. З. В. Черданцевой).

I. Методы и приборы для экспериментального получения кривых переменного тока.

I. Диск Joubert'a

Первый по времени способ для экспериментального получения кривых переменного тока был дан Joubert'ом [1]); он основан на применении особого диска, вращающегося синхронно с генератором того переменного тока, который исследуется, называемого **диском** или **шайбой** Joubert'a. Схемы включений возможны здесь весьма разнообразные,—мы опишем в дальнейшем две наиболее удобные, типичные и часто встречающиеся.

На фиг. 205 цифрой *2* обозначены кольца генератора переменного тока с нажимающими на них щетками. На валу генератора насажен диск *1* из изолирующего материала (**обыкновенно—эбонитовый**); часть его цилиндрической поверхности занята медной полоской; на диск нажимают две щетки. Если мы замкнем рубильник *8*, то цепь будет замыкаться в те промежутки времени, когда обе щетки касаются медной полоски на диске: в это время заряжается конденсатор *4* и в параллельной ему ветви *5—6—7* течет ток, отклоняющий гальванометр *6*; как только одна из щеток на кольце *1* сходит с медной полоски, цепь размыкается и все остальное (во много большее) время оборота остается разомкнутой; в это время конденсатор *4*, разряжаясь через гальванометр *6*, поддерживает его отклонение. Отклонение гальванометра мы и принимаем за меру мгновенного значения напряжения генератора в тот момент в течение периода, т.-е. при том положении обмотки генератора в магнитном поле полюсов, когда происходит одновременное касание щеток к **контактной полоске на диске** *1*.



Фиг. 205.

Эти щетки поддерживаются двумя щеткодержателями, которые можно оба вместе поворачивать, отсчитывая угол поворота посредством

указателя на неподвижном круге; таким поворотом мы сдвигаем одновременное касание щеток полоски, т.-е. замыкание цепи, на другой более поздний или более ранний момент времени, смотря по направлению поворота относительно направления вращения генератора. При этом получается отклонение гальванометра, соответствующее мгновенному значению эл.-дв. силы или напряжения генератора в этот новый момент или новому положению обмотки под полюсами в момент замыкания цепи.

Заметим, что это замыкание происходит один раз за p периодов, если p есть число пар полюсов генератора, т. к. за один оборот протекает p периодов.

Обозначенное на фиг. 205 сопротивление *3* предназначено для регулирования той части напряжения, которая подается на конденсатор *4*; сопротивление *5* включено перед гальванометром и делается обыкновенно большим, напр., 100.000 омов; сопротивленне *7* играет роль шунта у гальванометра. Емкость конденсатора берется обыкновенно около 1 микрофарады.

Меньшие значения емкости удобны тем, что конденсатор успевает вполне, или почти вполне, зарядиться; гальванометр при этом испытывает отклонение спокойное, но небольшое; с увеличением емкости оно растет, но делается при известной величине емкости неспокойным, что обозначает, что конденсатор при этой величине его емкости не успевает вполне зарядиться, пока цепь замкнута.

Отклонения гальванометра пропорциональны мгновенным значениям напряжения генератора; нанося их на бумагу, как ординаты, при чем абсциссами явятся углы поворота щеткодержателей от некоторого произвольного положения,—получим кривую напряжения. Чтобы иметь масштаб для определения значений напряжения в вольтах, надо сделать сравнение с отклонением гальванометра в том случае, когда вместо генератора *2* переменного тока включен источник постоянного тока, напряжение на зажимах которого легко определить с достаточной точностью. Как и во всех случаях пользования гальванометром, точность измерений может быть весьма повышена применением т. наз. нулевого метода, при котором известный отсчет производится при условии равенства нулю тока через гальванометр.

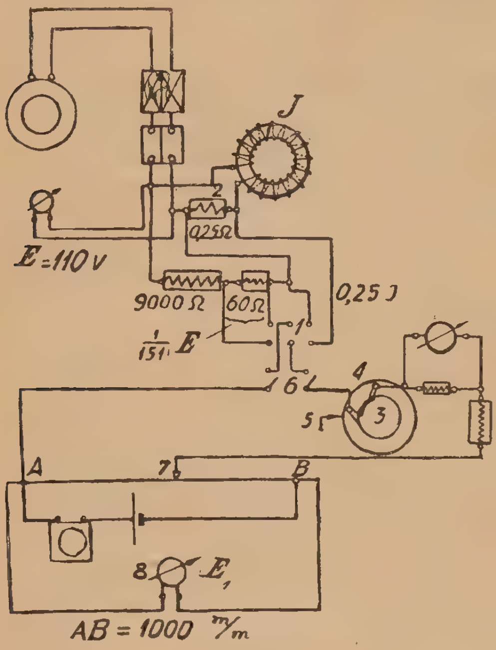
Необходимость применения нулевого метода приводит к употреблению компенсационного способа измерения напряжения. На фиг. 206 дана схема включений с диском Joubert'а для снятия кривых напряжения и силы тока при помощи компенсационного способа; чтобы придать бо́льшую ясность схеме и описанию, мы выбрали конкретный случай—снятие кривых напряжения и силы тока при намагничении переменным током катушки с железным сердечником при данных, взятых непосредственно из лабораторной практики.

На схеме цифрой *1* обозначен переключатель: при левом положении, мы подаем на ниже показанный рубильник *6* определенную часть всего напряжения, при правом—напряжение на небольшом уаттном сопротивлении *2*, находящееся в фазе с током J в катушке и ему пропорциональное; от рубильника *6* цепь, через диск Joubert'а *3*, гальванометр с шунтом и добавочное сопротивление присоединяются к той или другой части калиброванной проволоки AB компенсационного прибора. Перемещением контакта *7* достигается такое его положение, что гальванометр остается без тока также и в те же

моменты, когда щетки и полоска на диске замыкают цепь, что укажет на равенство напряжения, которое в эти моменты подается на рубильник *6* с напряжением на участке *A—7*. Все напряжение на *AB* при этом определяется при помощи вольтметра эталона *8*, проверенного компенсационным способом.

Когда генератор переменного тока не доступен, диск Joubert'а насаживается на вал особого синхронного двигателя [2]).

Каждому новому положению щеток, отсчитываемому при помощи неподвижного указателя *5* на диске *4* с делениями, связанном со щетками, соответствует новое значение исследуемых напряжения и силы тока. Следует заметить, что продолжительность промежутка времени, когда обе щетки нажимают на металлическую полоску на диске не должна быть велика, иначе, при острых изгибах кривой исследуемого напряжения (или силы тока), будет действовать на участке *A—7* не истинное значение его в определенный момент времени, а переменное, при чем вообще компенсация напряжений не будет возможна.



Фиг. 206.

Щетки располагаются так по отношению к полоске, чтобы их одновременное касание к ней т.-е. замыкание цепи прекращалось при повороте диска на угол 2°—5° из того положения, когда это замыкание началось.

Franke построил особый аппарат для полуавтоматического вычерчивания кривой (требуется поворачивать от руки определенные части аппарата [3]).

Rosa и Callendar описали конструкции аппаратов, позволяющих полуавтоматическое и автоматическое получение кривых при компенсационном способе [4]).

Goldschmidt и Ryan предложили заменить механический контакт на диске Joubert'а,—особым магнитным [5]).

Из предыдущего ясно, что применение диска Joubert'а, требующее много времени для снятия кривой, возможно лишь в том случае, когда процесс изменения напряжения и тока со временем есть процесс установившийся.

---

[1]) Joubert. Journ de phys. (9), 297, (1880), Compt. rend. (91), 161, (1880).
[2]) Michalke. ETZ (1896), 462.
[3]) Franke. ETZ (20), 802 (1899), ZfJ (21), 11 (1901).
[4]) Rosa (Callendar). El. (40), 126, 221, 318, (1897) (41), 582 (1898), Phys. Rev. (6), 17, (1898), ZfI (18), 257, (1898). Ref.
[5]) Goldschmidt. ETZ (23), 496, (1902), ZfJ (22), 347 (1902). Ref.
Ryan. Tr. AJEE (16), 345 (1900).

Кроме этого следующие статьи посвящены снятию кривых с помощью диска Jouber'a.

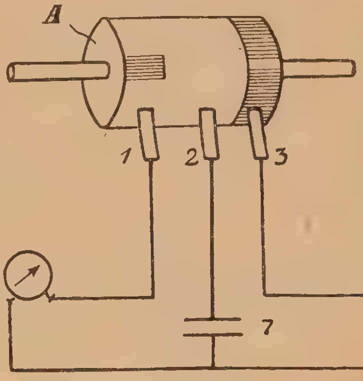
Carpentier. Ecl. El. (35), 401, L'Electr. (25), 330, 351.
Dréxler. ETZ (17), 378 (1896).
Eichbery. ETZ (18), 556 (1897).
Kübler. ETZ (18), 652 (1897).
Laws. Proc. AJEE (36), 321 (1901), El. (46) 796, (1901).
Lutoslawski. ETZ (17), 211 (1896).
Marcher. ETZ (18), 220 (1897).
Niethammer. ETZ (21), 309, (1900).
Owens. End. (74), 741, (1902), ZfJ (23), 128 (1903). Ref.
Peukert. ETZ (20), 622 (1899).

---

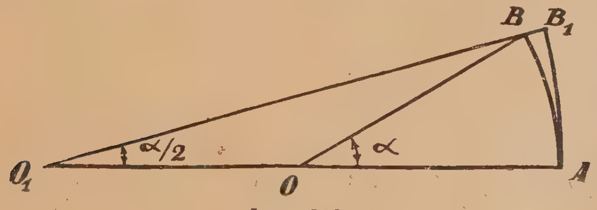
2. Ондограф Hospitalier.

Hospitalier построил прибор для вполне автоматического вычерчивания кривых, названный им ондографом и представляющий следующие особенности.

Роль описанного выше диска Joubert'a в приборе Hospitalier играет цилиндр *A* из изолирующего материала, изображенный на фиг. 207; цилиндр *A* покрыт медной оболочкой с вырезами, заштрихованными на фигуре; зажимы *4—5* присоединяются к источнику тока; цифрой *6* обозначен особый гальванометрический прибор; цифрой *7*—конденсатор. Из схемы фиг. 207—ясно, что пока, весьма непродолжительно, заряжается конденсатор, гальванометр не подключен к цепи, остальное время в течение оборота конденсатор разряжается на гальванометр. Цилиндр *A* вращается зубчатой передачей от четырехполюсного синхронного двигателя. Передача такова, что за то время, когда двигатель делает 1000 оборотов, цилиндр *A* делает 999 оборотов, и это равносильно тому, как если бы цилиндр *A* сделал тоже 1000 оборотов, а щетки *1—2—3* сделали за это время один полный оборот навстречу вращению цилиндра. Так как двигатель четырехполюсный, то время 1000 оборотов его составляет 40 секунд,—такова продолжительность всего получения кривой, которая при этом вычерчивается на цилиндрической поверхности вращающегося от того же двигателя барабана; поверхность эта покрыта особой бумагой, число оборотов барабана подобрано посредством передачи таким, что на окружности его помещается обычно три полных периода кривой. Пишущее перо прикреплено к стержню O_1B_1 в его конце B_1, фиг. 208.

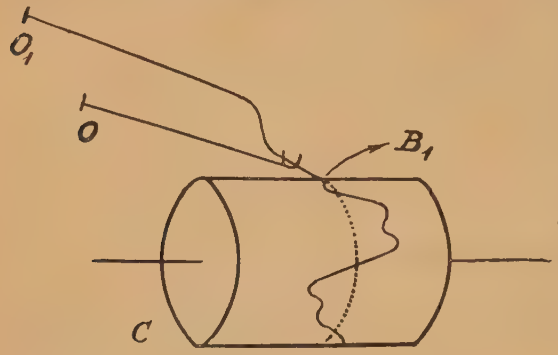


Фиг. 207.



Фиг. 208.

Стержень этот может поворачиваться около точки O_1, увлекаемый стрелкой OB гальванометра обыкновенного типа Deprez D'Arsonval'я. На конце B стрелки гальванометра имеется вилочка, через которую и проходит стержень O_1B_1. Длина стержня $O_1B_1 = 2OB = 36$ *cm*; этим способом достигается приблизительная прямолинейность дуг AB_1, т.-е. ординат кривой, вычерчиваемой пером B_1 на барабане C, фиг. 209.



Фиг. 209.

В тех случаях, когда кривая представляет очень резкие или острые изгибы, нельзя было бы при такой скорости снятия кривой быть уверенным, что стрелка успевает принять отклонение, соответствующее значению силы тока через гальванометр.

Для употребления в этих случаях Hospitalier дал подобный же аппарат, в котором, однако, можно от руки придавать контактному цилиндру A и связанному с ним барабану C любую, меньшую прежней, скорость вращения и оставлять контакты дольше в одном положении при снятии точек острых изгибов кривой.

Ондограф Hospitalier применим, как видно из его описания, тоже только для установившихся процессов изменения переменного тока.

Hospitalier. L'Electr. (22), 194 (1901); El. (52) 298, (1904), Ecl. El. (28), 64, (1901); (35), 479, (1903).
ZfI (22), (166), (1902). Ref.

---

3. Осциллографы по Blondel'ю.

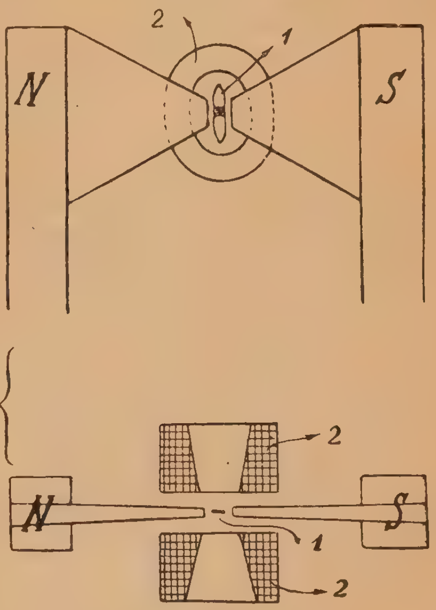
Описание.

Два нижеописанные вида осциллографов были изобретены и теория их была дана впервые Blondel'ем [1]).

Осциллографы Blondel'я можно рассматривать, как гальванометры, у которых подвижная система обладает чрезвычайно малым периодом собственных колебаний,—т.-е. малой инерцией,—и достаточным успокоением и может поэтому следовать с достаточной точностью за быстрыми изменениями в силе переменного тока, проходящего через этот гальванометр. Первый более старый, теперь мало употребляющийся тип осциллографа Blondel'я является видоизменением гальванометра с подвижной магнитной стрелкой. Здесь вместо магнитной стрелки мы имеем просто полоску (1) мягкого легко перемагничивающегося железа (фиг. 210), находящуюся между полюсами сильного постоянного магнита (или электромагнита), который здесь заменяет землю с ее магнитным полем в гальванометре. Полоска эта имеет заостренные концы, которыми и упирается в две опоры; посередине на полоске прикреплено маленькое зеркальце. Переменный ток, проходящий по катушкам 2—2, изменяет магнитное поле, и полоска

поворачивается около своей оси, стремясь установиться так, чтобы находиться в плоскости магнитных линий, при чем угол поворота пропорционален силе тока в катушке; вместе с нею поворачивается и луч света, падающий на зеркальце от лампы, через линзу, и отражающийся от зеркальца.

Чтобы представить эти углы отклонения в функции времени, т.-е. получить видимую кривую переменного тока, этот отразившийся от зеркальца луч заставляют, после прохода еще одной собирательной линзы, падать на белую боковую поверхность цилиндра, защищенного от постороннего света, вращающегося с равномерною скоростью, совершенно подобно цилиндру C на фиг. 209 в ондографе Hospitalier. Если на боковую поверхность цилиндра наложить фотографическую бумагу, то можно получить фотографию кривой. Таким образом можно получить кривые изменения тока и напряжения при весьма быстро протекающих неустановившихся процессах этих изменений (напр., при включении и выключении тока), чего нельзя достичь при помощи диска Joubert'а; наблюдая кривые, можно непосредственно видеть, как изменяется их форма при изменении тех или иных „постоянных“ в цепи, рода нагрузки и т. д.



Фиг. 210.

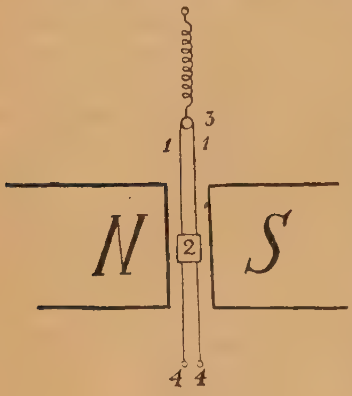
В более поздних конструкциях полоска не упирается в опоры, а натянута в виде тонкой и узкой ленточки; действие, понятно, остается тем же самым, но период собственных колебаний может быть достигнут еще меньший—до 1 : 50.000 секунды. Причиною этого является то, что „направляющая сила“ в первой конструкции создается только одним магнитным полем постоянного магнита, а во второй конструкции, кроме того, еще и натяжением ленточки. Следовательно, при второй конструкции направляющая сила больше, продолжительность же периода собственных колебаний обратно пропорциональна корню квадратному из величины направляющей силы.

При второй конструкции осциллограф точнее успеет передать острые места в кривой переменного тока. Следует, однако, позаботиться о том, чтобы отклоненная от положения равновесия полоска не стала колебаться с собственным периодом, так как эти колебания наложились бы на исследуемые колебания ее под действием переменного тока и исказили бы картину последних; поэтому необходимо **достаточно сильное** успокоение; оно достигается тем, что колеблющаяся полоска окружается трубочкой с донышком, в которую наливается масло (чаще всего вазелиновое).

Hotchkiss и Millis сконструировали подобный осциллограф, не применяя такого искусственного успокоения [2]).

Осциллографы описанной конструкции допускают менее осторожное обращение, чем осциллографы ниже описанной бифилярной системы; их можно значительно перегружать током, так как ток

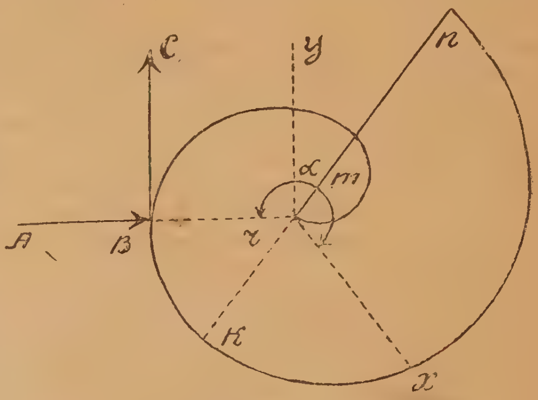
проходит только через катушки 2—2; недостатком их является небольшая чувствительность: достаточно сильные отклонения получаются лишь при силе тока в катушках большей 0,1 амп. (часто 0,3 А); другим недостатком является то обстоятельство, что катушки 2—2 представляют собою самоиндукцию, которая влияет на форму кривой тока и на сдвиг фаз.



Фиг. 211.

Чтобы дать возможность получать одновременно и кривую силы тока, и кривую напряжения, магнитную цепь постоянного магнита прерывают не одним воздушным промежутком, как на фиг. 210, а двумя, и помещают в каждом промежутке полоску с зеркальцем и против них—по две катушки; через одну пару катушек пропускают ток, находящийся в фазе с напряжением и ему пропорциональный, через другую — определенную часть силы тока в исследуемой цепи.

Большее распространение получили осциллографы бифилярные, являющиеся видоизменением гальванометра с подвижной катушкой. На фигуре 211 представлена схема такого осциллографа, 1—1 петля из тонкого проводника, туго натянутая роликом 3 и несущая зеркальце 2; N и S полюса сильного электромагнита. В двойных осциллографах делается два воздушных промежутка и помещается две петли, одна для тока, другая для напряжения. Дуддель (Duddel) [3]) стал употреблять для петли 1—1 не круглый проводник, а тонкую ленточку; это увеличивает направляющую силу и делает более удобным прикрепление зеркальца.



Фиг. 212.

Период собственных колебаний у бифилярных осциллографов, вообще говоря, больше, чем у осциллографов с колеблющейся полоской.

Blondel с петлей из алюминия достигал периода в 1 : 15.000 секунды, — обыкновенно же эти осциллографы имеют продолжительность периода в 1 : 5.000 — 1 : 10.000 секунды.

Большею частью применяется масляное успокоение. Приспособления для того, чтобы получить видимую кривую, применяются разные; напр., такой же цилиндр, как было описано выше, вращающееся зеркало, как в осциллографах Duddel'я, наконец вращающийся цилиндр, у которого направляющей является часть кривой, называемой Архимедовой спиралью (фиг. 212)—в осциллографах Siemens-Halske. У этой спирали длина радиуса вектора пропорциональна углу его поворота от начального положения OX, т.-е. $r = C \cdot \alpha$, а так как $OX = C \cdot 2\pi$, то $r = \frac{OX}{2\pi} \cdot \alpha$. Пусть AB есть луч, падающий от зер-

кальца осциллографа на цилиндрическую поверхность BX; BC есть луч, отразившийся и идущий в глаз наблюдателя. При повороте цилиндра около точки O по часовой стрелке луч BC будет удаляться от линии OY, и наблюдателю светящаяся точка будет казаться движущейся по направлению от O к B. Так как в то же время луч AB колеблется в плоскости параллельной оси цилиндра, то глаз наблюдателя увидит кривую, описываемую светящейся точкой.

Наложим на спираль фиг. 211 другую такую же спираль, повернув ее относительно первой на 180°, и мы получим фигуру, ограниченную двумя дугами спиралей (из которых одна есть kXn) и двумя прямыми (одна из них mn); цилиндр с таким основанием есть вторая употребляющаяся фирмой Siemens & Halske форма такого рода приспособления.

Обратимся теперь к выяснению вопроса о точности, с которой осциллограф передает кривую переменного тока. Заметим прежде всего, что если успокоение подвижной системы слишком велико, то, несмотря на малую инерцию, она все же не успеет следовать с достаточной точностью за изменениями переменного тока. (Пример из механики: маятник с малым периодом колебаний, помещенный в вязкую жидкость, не сможет следовать за изменениями приложенной к нему силы, хотя медленно будет передвигаться под действием постоянной силы, даже несравненно меньшей первой). Таким образом, вообще, существует наивыгоднейшая (в смысле точности изображения кривой) величина успокоения. Перейдем к исследованию вопроса аналитически.

Теория осциллографа.

Подвижная система осциллографа движется с переменной скоростью. Обозначим угол отклонения ее от положения, когда переменный ток на нее не действует, через α. При движении на подвижную систему будет действовать несколько сил; во-первых, сила со стороны магнитного поля исследуемого переменного тока, — обозначим ее момент, переменный с течением времени, через M; во-вторых, направляющая сила, в бифилярном осциллографе она пропорциональна углу кручения, т.-е. α, плечо ее здесь постоянно; в осциллографе с железной полоской момент ее равен $H.\,l.\,\sin\,\alpha$, где H напряжение поля магнита, l—ширина полоски, при малых α можно этот момент приближенно считать тоже пропорциональным α; в-третьих, действует на подвижную систему успокоение, то или иное трение, пропорциональное скорости движения системы.

Обозначим еще через K момент инерции системы; уравнение движения системы напишется так:

$$K\frac{d^2\alpha}{dt^2}+A\frac{d\alpha}{dt}+B\alpha=M \quad \text{. . . . . (I)}$$

Чтобы получить полный интеграл этого дифференциального ур-ия (так называемого уравнения с последним членом), надо знать одно его частное решение α и затем полное решение α_0 того же уравнения, но без последнего члена, т.-е. уравнения, получающегося заменой в правой части величины M нулем. Тогда полный интеграл уравнения (I) есть $\alpha+\alpha_0\times$ произвольную постоянную. Физический смысл этого решения—тот, что на вынужденные колебания α подвижной системы накладываются ее собственные или свободные ко-

лебания α_0, которые, как уже сказано выше, искажают картину первых. Необходима такая величина успокоения, чтобы движение системы было апериодическим, т.-е. чтобы период его был бесконечно велик. Для уравнения (I) без последнего члена имеем

$$\alpha_0 = e^{-\frac{A}{2k}t} \cdot C \sin(\omega_0 t + \varphi),$$

где C и φ определяются из начальных условий, а

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{B}{K} - \frac{A^2}{4K^2}} \qquad \text{(II)}$$

Чтобы движение было апериодическим, необходимо и достаточно, чтобы величина под радикалом (II) равнялась нулю, отсюда

$$A = 2\sqrt{BK} \qquad \text{(III)}$$

Величина затухания бо́льшая этой будет излишне тормозить движение, вызывать отставание его от изменения тока; величина меньшая вызовет появление собственных колебаний. Исследуем теперь интеграл уравнения (I) с последним членом. Чтобы найти частное решение его α, надо знать вид функции M. Если бы кривая переменного тока была чистой синусоидой, то и M, как величина пропорциональная напряжению поля постоянного магнита и силе переменного тока, была бы тоже синусоидальной функцией времени.

В действительности, кривая силы тока имеет сложную форму, но мы ее можем рассматривать по теореме Фурье, как сумму синусоидальных величин различных периодов; поэтому и M явится такой же функцией времени. Обозначая через T период тока и вводя

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

имеем

$$M = \sum_{n=1}^{n=\infty} M_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \qquad \text{(IV)}$$

Частное решение уравнения (I) дается в форме

$$\alpha = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left\{ C'_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + C''_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \right\} \qquad \text{(V)}$$

Где C'_n и C''_n в данном случае являются постоянными величинами, подлежащими определению.

Подставим выражения α и его первой и второй производной на основании (V) в ур. (I). Действие каждой отдельной составляющей тока не зависит от других; поэтому приравниваем коэффициенты при cos'ах определенного порядка в левой части таковым в правой, тоже сделаем с коэффициентами при синусах; и так поступим для всех частот. После этого получим по два уравнения для каждого порядка для определения C'_n и C''_n; решая их, получаем выражения вида:

$$\left.\begin{aligned} C'_n &= M_n \frac{B - Kn^2\omega^2}{(B - Kn^2\omega^2)^2 + A^2n^2\omega^2} \\ C''_n &= -M_n \frac{An\omega}{(B - Kn^2\omega^2)^2 + A^2n^2\omega^2} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(VI)}$$

Выражение (V) теперь легко преобразуется после введения вспомогательного угла β_n, такого, что

$$\operatorname{tg} \beta_n = \frac{An\omega}{B - Kn^2\omega^2}, \qquad \text{(VII)}$$

в такой вид

$$\alpha = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{M_n}{\sqrt{(B - Kn^2\omega^2)^2 + A^2n^2\omega^2}} \sin(n\omega t + \varphi_n - \beta_n) \qquad \text{(VIII)}$$

Таким образом, как видим из (VIII), отношение амплитуд составляющих колебания системы к амплитудам составляющих соответствующих порядков переменного тока не постоянно, но меняется с порядком составляющей; кривая тока передается изображением не совсем точно.

Примем во внимание условие (III); при его выполнении знаменатель в (VIII) превращается в

$$B + Kn^2\omega^2,$$

таким образом,

$$\frac{\alpha_{n\,\max}}{M_n} = \frac{1}{B + Kn^2\omega^2} \qquad \text{(IX)}$$

Чтобы сделать дальнейшие вычисления более удобными, введем в наши формулы две следующие величины; во-первых—период переменного тока

$$T = \frac{2\pi}{\omega},$$

во-вторых, период колебания подвижной системы в том случае, когда успокоение равно нулю; из формулы (II) этот период при $A = 0$ получается, как

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{K}{B}}.$$

Далее будем иметь отношение этих периодов

$$\lambda = \frac{T_0}{T} = \omega\sqrt{\frac{K}{B}} \qquad \text{(X)}$$

Поэтому из формулы (IX) имеем:

$$\frac{\alpha_{n\,\max}}{M_n} = \frac{1}{B\left(1 + \frac{K}{B}\omega^2 n^2\right)} = \frac{1}{B\left(1 + \lambda^2 n^2\right)}$$

Применим выведенные формулы к такому осциллографу, у которого $T_0 = 1:3.000$ секунды (ниже этой величины, и то немного, до $1:2.500$, спускаются при построении осциллографов лишь для демонстрационных целей, а не для точных измерений).

В этом случае при $T = 1:50$ секунды

$$\lambda = \frac{1}{60}$$

Для составляющей 1-го порядка ($n = 1$)

$$\frac{\alpha_{1\,max}}{M_1} = \frac{3600}{B \cdot 3601}$$

Для составляющей 9-го порядка ($n = 9$)

$$\frac{\alpha_{9\,max}}{M_9} = \frac{3600}{B \cdot 3681}$$

Таким образом, изменение отношения амплитуд тока (величина M_n пропорциональна J_n) и отклонения для составляющей 9-го порядка составляет всего лишь 2,1% сравнительно с 1-м порядком; для низших порядков эта величина будет меньше; в тех случаях, когда составляющие высших порядков имеют амплитуды значительно меньше амплитуды первого порядка,—этим искажением кривой тока в ее изображении можно пренебречь. Далее, как показывает сравнение формул (VII) и (IV), составляющие высших порядков отклонения α (или, иначе, изображения кривой тока) имеют разный для разных порядков сдвиг фаз β_n по отношению к составляющим тока (они разно запаздывают в изображении по сравнению с действительным током).

Преобразуем выражение (VII), считая, что удовлетворяется соотношение (III),—

$$\operatorname{tg} \beta_n = \frac{2\sqrt{BK}n\omega}{B - Kn^2\omega^2} = \frac{2n\lambda}{1 - n^2\lambda_2} \quad \text{(XI)}$$

Подставляя для примера опять

$$\lambda = \frac{1}{60},$$

имеем

$$\operatorname{tg} \beta_n = \frac{120n}{3600 - n^2} \quad \text{(XII)}$$

Обозначим длину основания, т.-е. отрезок оси абсцисс, выражающий длину периода для составляющей первого порядка, через l; для составляющей n-го порядка этот отрезок в n раз меньше, чем для первого, поэтому линейный сдвиг этой составляющей n-го порядка выразится через

$$\frac{\beta_n}{2\pi} \cdot \frac{l}{n}.$$

Поскольку в формуле (XI) можно тангенс заменить углом, мы можем написать, что линейный сдвиг синусоиды n-го порядка выражается так:

$$\frac{\lambda l}{\pi\,(1 - n^2\lambda^2)};$$

эта величина при малых λ изменяется в зависимости от n очень мало, т.-е. синусоиды всех порядков сдвинутся в изображении почти на одну и ту же небольшую длину, т.-е. кривая в изображении почти не исказится.

---

[1]) Blondel. Compt. rend. (116), 502, 748 (1893); Ind. El. (8), 137; 361 (1899); Rapport. près. en congres intern. de phys. á Paris en 1900 (3). 264; Journ. de phys. (1) 273 (1902).

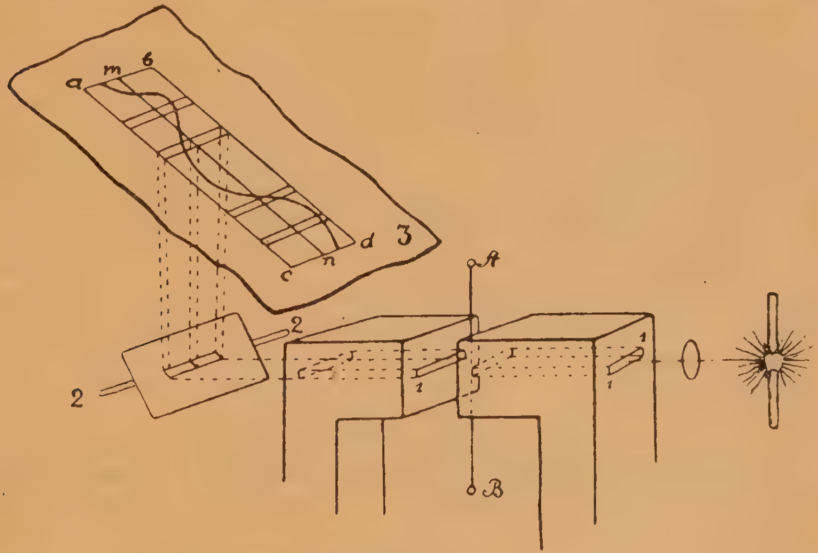
[2]) Hotchkiss and Millis. Phys. Rev. (3), 49, (1895); (8), 152 (1899).

[3]) Duddel. El. (39), 636 (1897); Journ. Inst.El. Eng. (28), 1 (1899).

4. Осциллографы других систем с подвижной системой, обладающей инерцией.

Интересным видоизменением описанного типа осциллографов по Blondel'ю является осциллограф, строящийся фирмою Gans изображенный схематически на фиг. 213.

Особенности его в том, что у подвижной его системы нет зеркальца; ток проходит не по петле, а по одной медной ленточке *AB*, помещенной между полюсами сильного эл.-магнита; в полюсах его вдоль магнитных линий сделаны очень узкие щели *1—1*. Эти щели дуговою лампою с помощью системы линз проектируются на экран (*3*), при чем проводник *AB* дает черную линию—тень—на светлом изображении щели. Прежде чем попасть на экран, лучи отражаются от зеркала, могущего вращаться около оси *2—2*, параллельной длине щели. Если мы будем зеркало быстро вращать, то получим на экране



Фиг. 213.

(на фигуре мы экран видим с обратной стороны) длинную светлую полосу *abcd* посредине прямую черную линию *mn*—тень полоски *AB*. Если по полоске *AB* пропустить постоянный ток, полоска сдвинется с средины щели и линия *mn* будет не по середине полосы *abcd*; если пропустить по *AB* переменный ток, полоска *AB* будет занимать в разные моменты времени разное положение против щели, и ее тень даст на экране черную кривую на светлом фоне полосы *abcd*.

Подобная же идея положена в основу струнного гальванометра, который много раньше осциллографа Gans'а был предложен Adler'-ом и разработан Einthoven'ом[1]); в этом гальванометре вместо полоски *AB* употребляется тонкая платиновая, серебряная или посеребренная кварцевая нить; отклонения ее наблюдаются в микроскоп через такие же щели в сердечнике электромагнита.

Abraham[2]) построил особый прибор реограф; это есть осциллограф с сравнительно большой инерцией и большим периодом собственных колебаний (приблизительно $\frac{1}{10}$ секунды); вредное влияние

инерции и успокоения Abraham устранил следующим образом. В уравнении (I) величина M пропорциональна мгновенным значениям тока через осциллограф i_o, т.-е. $M=Ni_o$; посредством особого трансформатора и разветвлений в цепи Abraham посылает в гальванометр ток i_o, который удовлетворяет следующему уравнению:

$$K\frac{d^2i}{dt^2}+A\frac{di}{dt}+Bi=Ni_o\,, \qquad (A)$$

таким образом данное уравнение и уравнение (I) должны удовлетворяться одним и тем же решением, т.-е. отклонение α должно быть точно пропорционально i. Для того, чтобы подобрать систему разветвлений токов i_o и i соответственно уравнению (A), используется ток точно известной формы.

Для демонстрационных целей по вышеописанным принципам строятся более грубые осциллографы. Конструкции их предложены Wehnelt'ом и Wittman'ом (изготовляются фирмой Edelmann-München). Реограф Abraham'а по самой идее очень пригоден для демонстраций, т. к. он может нести большое зеркальце.

Irvin[3]) и фирма Rob. Paul (London) построили тепловой осциллограф; в нем по двум разветвлениям тонких проволок проходит исследуемый переменный ток и определенной силы постоянный, в одной ветви складываясь, в другой — вычитаясь; от этого выделяющееся в разных проволочках количество тепла различно; разница эта вызывает разницу в удлинениях проволочек, а последняя обусловливает отклонение зеркальца.

Эти осциллографы еще не достигли той степени точности, как другие, к тому же пережог проволочки влечет за собой больше работы по установке новой, чем в осциллографах Blondel'я.

Различными авторами описаны осциллографы для снятия кривых, изображающих какую-нибудь физическую величину не в функции времени, а в функции другой физической величины, напр., для снятия петли гистерезиса, где магнитная индукция представляется в функции силы намагничивающегося тока.

---

[1]) Einthoven. Ann. d. Ph. (12), 1059 (1903); (14), 182 (1904).
Hausrath. Die Saitengalvanometer. Отдельн. оттиск из „Helios" 1911.
[2]) Abraham. Bulletin de la Soc. int. des Elect. (14). 397 (1897).
Journ. de phys. (6), 356 (1897); Ecl. El. (11), 145 (1897).
Compt. rend. (124), 758 (1897); ZfJ (18), 30 (1898). Ref
Journ. de phys. (4), 273 (1909).
[3]) Irwin. El. (59), 266, 306 (1907); Journ. Inst El. Eng. (39), 617 (1907).
Liste HK (1910) Rob. Paul. (London).

---

5. Осциллографы, необладающие инерцией.

Для исследования переменных токов частоты большей, чем частота собственных колебаний подвижной системы вышеописанных осциллографов, последние непригодны, на смену им в этой области выдвигаются такие приборы, в которых отклоняющаяся переменным током система или совсем не обладает инерцией или инерция столь мала, что ее влияние не заметно даже и при столь большой частоте.

Электромагнитное вращение плоскости поляризации света.

Crehore[1]) предложил для исследования переменного тока применить явление вращения плоскости поляризации света в магнитном поле.

Switzer[2]) внес в этот способ усовершенствования. Угол вращения этой плоскости при прочих равных условиях зависит от длины волны света (всего меньше для лучей красных и всего больше для фиолетовых) и пропорционален силе тока, создающего поле. После прохождения лучом белого света через один николь, катушку с током вдоль по ее оси, обычной трубе, второй николь при данной силе тока, т.-е. при данном поле, сможет погасить только один из составляющих лучей, при другой силе тока гасится другой луч; таким образом в спектре, получаемом посредством добавочной призмы, получается перемещающаяся темная линия. Особой пластиной из кварца, на пути луча достигается постоянство ширины этой темной линии и приблизительная пропорциональность ее сдвига в спектре силе тока.

Способ этот не нашел себе применения в практике исследований по своей сложности так же, как и видоизменение его, предложенное Abraham'ом и Buisson'ом[3]) и состоящее в том, что, во-первых, применяется контактный аппарат со щетками, замыкающий ток в одной и той же его фазе, пока остается не измененным соответствующее положение щеток, и, во-вторых, — вращение плоскости поляризации переменным током уравновешивается с помощью другой катушки с постоянным током, который легко измерить; сила его пропорциональна мгновенному значению переменного тока; наблюдения производятся с полутеневым поляриметром; передвигая щетки, можно получить всю кривую.

Трубка Braun'а[4]).

Этот метод исследования токов высокой частоты основан на применении явления отклонения катодных лучей в магнитном поле. Из всего пучка катодных лучей в трубке Брауна с помощью алюминиевой перегородки и круглого отверстия в ней (1 *mm* диаметром) выделяется узкий цилиндрический пучок, который попадая на экран, покрытый фосфоресцирующим веществом, вызывает на нем круглое светлое пятнышко. Магнитное поле катушки, ось которой перпендикулярна к оси пучка лучей, и которую мы питаем переменным током. вызывает отклонение пятнышка,пропорциональное напряжению поля, а следовательно—мгновенному значению переменного тока. Пятнышко наблюдается в очень быстро вращающееся зеркало, и в нем наблюдатель видит кривую, абсциссы которой пропорциональны углу поворота зеркала и, следовательно, времени, и ординаты суть отклонения пятнышка, следовательно, величины пропорциональные мгновенным значениям тока.

Seefehlner[5]) предложил следующий способ получения кривой без зеркала прямо на экране.

Перпендикулярно к катушке с переменным током располагают вторую так, чтобы ось ее тоже проходила через ось пучка и пускают через нее от батареи элементов ток, силу которого при помощи переменного сопротивления делают пропорциональной времени; по истечении одного или двух периодов исследуемого переменного тока этот второй ток начинает свое изменение сначала. Тогда

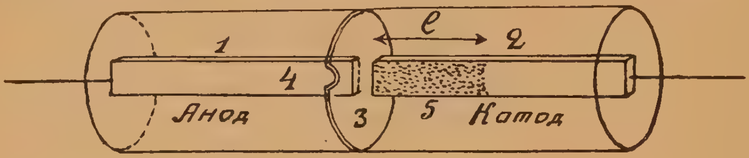
пятнышко испытывает на экране кроме первого отклонения по ординатам еще и второе по оси абсцисс, пропорциональное времени.

Трубки Брауна вошли в практику лабораторных измерений. Чтобы избегнуть замыкания цепи для снятия кривой напряжения, пользуются отклонением луча в электростатическом поле между двух пластин, к которым подведено исследуемое напряжение [6]).

Осциллограф Gehrke [7]).

В цилиндрическую стеклянную трубку, фиг. 214, впаяны два никелевых электрода, 1 и 2, в виде четырехугольных пластинок; длина каждого электрода составляет почти половину длины трубки; между концами электродов находится пластинка из слюды *3* с отверстием *4* для прохода тока. Трубка наполнена азотом или воздухом под давлением 7—8 *mm*.

Если мы приложим к трубке напряжение от постоянного тока, то катод покрывается тонкой светлой оболочкой (*5*), которая, если смотреть на нее сбоку, - так, чтобы видеть узкие длинные стороны



Фиг. 214.

электродов, — кажется светлой линией некоторой ширины; длина ее *l* пропорциональна силе тока через трубку, т.-е. и напряжению. При переменном токе в течение каждой половины периода будет покрываться такой светлой оболочкой один из электродов. Смотря на осциллограф через вращающееся зеркало, увидим кривую тока, но не в виде светлой линии, как от трубки Braun'а, а в виде светлой площади, вверху оси абсцисс одну половину периода и внизу от нее—другую половину периода.

Недостатком осциллографа Герке является то обстоятельство, что светящийся разряд происходит лишь при напряжении между электродами выше 300 вольт; поэтому этот осциллограф годится для снятия кривых токов достаточно высокого напряжения, и то в этих кривых будет недоставать частей площади, соответствующих значениям ординат меньше 300 вольт; при этих значениях свечения нет, и каждая половина кривой будет с боков около нулевых значений ординат как бы срезана,—одна половина периода от другой отделена темным пространством. Осциллографы Gehrke готовит фирма H. Boas в Берлине, снабжая их двигателем, вращающем зеркало; двигатель с зеркалом могут делать от 12.000 до 14.000 оборотов в минуту; в этих осциллографах в изображении кривой можно различать еще отдельные колебания тока частотой 7,5 . 10^5, при чем период занимает длину в 1 *mm*.

---

[1]) Crehore. Phys. Rev. (2), 122 (1894).
[2]) Switzer. Phys. Rev. (7), 83 (1898); Zfl (19), 189 (1899). Ref.
[3]) Abraham et Buisson. Compt. rend. (125), 92 (1897); Eclair. Electr (12) 21 (1897) Zfl (17); 376 (1897). Ref.
[4]) Braun. Wied Ann. (60), 552 (1897); ETZ (19), 204 (1898).
[5]) Seefehlner. ETZ (20), 121 (1899); (22), 554 (1901).
[6]) Ebert. Wied. Ann (61), 240 (1898).
Wehnelt. Verh. d. deutsch. Phys. Ges. (5), 29, 178 (1903).

II. Анализ кривых.

Анализировать кривую переменного тока $y=f(t)$ значит, определить амплитуды составляющих ее синусоид и косинусоид в разложении ее в ряд Fourier

$$y=f(t)=A_0+A_1\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)+A_2\sin\left(2\frac{2\pi t}{T}\right)+$$

$$+A_3\sin\left(3\frac{2\pi t}{T}\right)+\dots\dots\dots\dots+A_n\sin\left(n\frac{2\pi t}{T}\right)+$$

$$\dots+B_1\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)+B_2\cos\left(2\frac{2\pi t}{T}\right)+B_3\cos\left(3\frac{2\pi t}{T}\right)+$$

$$+\dots\dots+B_n\cos\left(n\frac{2\pi t}{T}\right)\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ . \quad (I)$$

Как известно из теории переменных токов, в большинстве случаев практики, $A_0=0$.

Определить амплитуды A_n и B_n ($n=1, 2, 3....$) можно несколькими способами; во-вервых, производя измерения в цеци переменного тока и наблюдая самую кривую, это есть метод экспериментального анализа; во-вторых, получив кривую на бумаге (с помощью диска Joubert'а или сфотографировав кривую в осциллографе и пр.)—производя или вычисления над ординатами $y=f(t)$ этой кривой или некоторые геометрические построения (перечерчивание кривой)—это суть арифметический и графический методы анализа; в-третьих, для анализа полученной на бумаге кривой можно применить механический прибор—анализатор.

1. Экспериментальный анализ.

Из теории переменных токов известно, что часто бывает более удобным пользоваться рядом (I) в другой его форме:

$$y=F_1\sin\left(\frac{2\pi t}{T}+\varphi_1\right)+F_2\sin\left(2\frac{2\pi t}{T}+\varphi_2\right)+\dots\dots$$

$$\dots\dots+F_n\sin\left(n\frac{2\pi t}{T}+\varphi_n\right)+\dots,\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ . \quad (II)$$

В дальнейшее положим

$$\frac{2\pi}{T}=\omega;$$

---

[7]) Gehrke. Verh. d. deutsch phys. Ges (6) 176 (1904); ZfI (25), 33, 278 (1905)
Кроме того о трубке Braun'a:
Ebert und Hoffmann. ETZ (19), 405, (1898).
Wehnelt und Donath. Wied. Ann (69) 861 (1899).
Weinhold. ETZ (22), 409 (1901).
Zenneck. Wied. Ann. (69), 838 (1899); ZfI (20) 191 (1900). Ref.

Обыкновенно составляющие четных порядков равны нулю; таким образом для напряжения имеем:

$$e = E_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + E_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) \ldots + E_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \ldots$$

и для силы тока

$$i = J_1 \sin(\omega t + \psi_1) + J_3 \sin(3\omega t + \psi_3) + \ldots + J_n \sin(n\omega t + \psi_n) + \ldots$$

при чем

$$J_n = \frac{E_n}{\sqrt{R^2 + \left(n\omega L - \frac{1}{n\omega C}\right)^2}}$$

где $n = 1, 3, 5, \ldots$

Подберем L и C в нашей цепи так, чтобы получился резонанс для составляющей какого-нибудь k порядка, т.-е. чтобы

$$k\omega L = \frac{1}{k\omega C}$$

$$\text{или} \quad k^2\omega^2 LC = 1 \quad \text{при этом} \quad J_k = \frac{E_k}{R},$$

а составляющие силы тока других порядков

$$J_n = \frac{E_n}{\sqrt{R^2 + n^2\omega^2 L^2\left(1 - \frac{1}{n^2\omega^2 LC}\right)^2}} =$$

$$= \frac{E_n}{\sqrt{R^2 + n^2\omega^2 L^2\left(1 - \frac{k^2}{n^2}\right)^2}}$$

Возьмем отношение J_k к J_n; оно равно

$$\frac{J_k}{J_n} = \frac{E_k}{E_n}\sqrt{1 + \frac{n^2\omega^2 L^2}{R^2}\left(1 - \frac{k^2}{n^2}\right)^2} = \frac{E_k}{E_n} n\omega \frac{L}{R}\left(1 - \frac{k^2}{n^2}\right) \times$$

$$\times \sqrt{1 + \frac{R^2}{n^2\omega^2 L^2\left(1 - \frac{k^2}{n^2}\right)^2}}$$

По этой формуле мы можем определить, в каком отношении находятся составляющие других порядков в силе тока к составляющей k-го порядка. Подбором R и L нетрудно сделать отношение J_k к J_n по меньшей мере раз в 10 больше отношения E_k к E_n так, что на кривой тока синусоида k-го порядка выступает чрезвычайно резко. Посредством двойного осциллографа наблюдают кривую напряжения и кривую силы тока; так как эта сила тока обыкновенно будет велика для петли осциллографа, ибо R должно быть не велико,—то эту петлю необходимо при этом шунтировать. Изменяя непрерывно в цепи L, наблюдаем кривые; когда кривая тока принимает по возможности близкую к синусоиде форму, тогда сравнением ее с кривой напряжения можно определить амплитуду и порядок той составляющей, для которой наступил резонанс.

Подвижная система осциллографа при этом должна обладать периодом много меньшим, чем период наивысшей определяемой нами составляющей.

Pupin. Am. Journ. Sc. (1894), 379, 473.
Armangat. Journ. de phys, (1902), 345.

2. Арифметический анализ.

Как показывается в теории переменных токов[1]), коэффициент A и B_k ряда (I) предыдущего параграфа могут быть определены из следующих соотношений:

$$\pi \cdot A_k = \int_0^T y \cdot \sin\,(k\,\omega t)\;d\;(\omega t)$$

$$\pi \cdot B_k = \int_0^T y \cdot \cos\,(k\omega t)\;d\;(\omega t)$$

или, вынося из-под знака дифференциала, а затем и интеграла величину $\omega = \frac{2\pi}{T}$ и деля на два, получим

$$\left.\begin{aligned} \frac{A_k}{2} &= \frac{1}{T}\int_0^T y \cdot \sin\,k\omega t \cdot dt \\ \frac{B_k}{2} &= \frac{1}{T}\int_0^T y \cdot \cos\,k\omega t \cdot dt \end{aligned}\right\}\quad\text{(III)}$$

Рассматривая правые части этих выражений, как средние арифметические за период от произведений $y.\ \sin\ k\omega t$ и $y.\ \cos\ k\omega t$, мы можем при практических вычислениях, когда кривая y задана графически, а не аналитически, заменить интегрирование суммированием конечного и даже небольшого количества слагаемых[2]).

Ограничимся тем случаем, когда кривая симметрична относительно оси абсцисс. Разделим период на $2n$ равных частей. Обозначим бегущую абсциссу точек делений через t_λ, а ординату анализируемой кривой через y_λ. Тогда вследствие симметричности полупериодов $\frac{A_k}{2} =$ $=$ среднему арифметическому от $(y_\lambda \cdot \sin k\omega t_\lambda)$ за полпериода.

Взяв здесь вместо sin'ов cos'ы, получим $\frac{B_k}{2}$.

Здесь всякое $t_\lambda = \lambda \cdot \frac{T}{2\pi}$.

Число k в этих формулах нечетное, так как вследствие симметрии кривой относительно оси абсцисс, она содержит составляющие только нечетного порядка. Условимся далее, что n число четное. Мы можем в формулы для A_k и B_k ввести упрощение, соединив члены попарно за исключением одного, приняв во внимание, что

$$\sin\ k\omega t_{n-\lambda} = \sin\left[k\omega\frac{T}{2\pi}(n-\lambda)\right] = \sin\left(k\pi - \frac{k\pi\lambda}{n}\right) = \sin\ k\omega t_\lambda\,;$$

$$\cos\ k\omega t_{n-\lambda} = \cos\left(k\pi - \frac{k\pi\lambda}{n}\right) = -\cos\ k\omega t_\lambda\,;$$

$$\sin k\omega t_n = 0\,;\ \cos k\omega t_n = -1\,;$$

$$\sin k\omega t_{\frac{n}{2}} = \sin\frac{k\pi}{2} = \pm 1;\ \cos k\omega t_{\frac{n}{2}} = \cos\frac{k\pi}{2} = 0\,.$$

Сделав эти подстановки и соединив попарно члены, получим

$$\frac{A_k}{2} = \frac{\sum\limits_{\lambda=1}^{\lambda=\frac{n}{2}-1}\left(y_\lambda + y_{n-\lambda}\right)\sin k\omega t_\lambda + y_{\frac{n}{2}}\sin\frac{k\pi}{2}}{n} \quad \ldots\ldots (\beta)$$

$$\frac{B_k}{2} = \frac{\sum\limits_{\lambda=1}^{\lambda=\frac{n}{2}-1}\left(y_\lambda - y_{n-\lambda}\right)\cos k\omega t_\lambda - y_n}{n}$$

Если образовать стоящие в скобках суммы и разности в начале вычислений, то последние весьма сокращаются.

Часто употребляют деление полупериода на 12 или на 18 частей. Рассмотрим технику вычислений в последнем случае. Итак, $n = 18$. Перейдем для наглядности в дальнейшем от радиантов к градусному измерению углов, так что

$$\sin k\omega t_\lambda = \sin k\,\frac{2\pi}{T}\cdot\lambda\frac{T}{2_n} = \sin k\lambda\,\frac{\pi}{n} = \sin(10k\lambda)^\circ,$$

так как $\frac{\pi}{n} = \frac{180^\circ}{18} = 10^\circ$.

Введем обозначения

$$y_\lambda + y_{n-\lambda} = u_\lambda\,,\quad y_\lambda - y_{n-\lambda} = v_{\frac{n}{2}-\lambda}\,,$$

$$y_{\frac{n}{2}} = u_{\frac{n}{2}}\,,\quad -y_n = v_{\frac{n}{2}}\,,$$

тогда из формулы (β) имеем

$$\left.\begin{aligned} 9A_k &= u_1 \sin 10k + u_2 \sin 20k + u_3 \sin 30k + \ldots + u_9 \sin 90k \\ 9B_k &= v_8 \cos 10k + v_7 \cos 20k + v_6 \cos 30k + \ldots + v_1 \cos 80k + v_9 \end{aligned}\right\} \ldots (\sigma)$$

где углы выражены в градусах.

Значения y_m, u_m и v_m можно написать в виде такой таблицы:

		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9
	y_{18}	y_{17}	y_{16}	y_{15}	y_{14}	y_{13}	y_{12}	y_{11}	y_{10}	
Суммы		u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9
Разности . . .	v_9	v_8	v_7	v_6	v_5	v_4	v_3	v_2	v_1	

При этом $u_9 = y_9$, $v_9 = -y_{18}$.

Подставляя в уравнения (σ) разные значения для k (нечетные), получим между прочим углы больше прямого. Превратим синусы и косинусы от них в синусы от углов меньших прямого. Например,

для составляющих 5-го порядка мы будем иметь при u_7 множителем $\sin\ (70.5)^\circ = -\sin 10^\circ$, при v_7 множитель будет $\cos\ (20.5)^\circ = -\sin 10^\circ$, т.-е. множители одинаковы.

Проделав это приведение к углам, меньшим прямого, мы увидим что для некоторых k различные члены ряда (σ) можно соединить в группы, вынося синусы за скобки. Результат сведен в следующую таблицу, где значения синусов, поделенные на 9, надо помножить на стоящие вправо величины u_m и произведения сложить по соответствующим вертикальным столбцам; сумма будет равна A_k или B_k

$^1/_9\ \sin 10^\circ = 0{,}01929$	u_1	u_1	$-u_7$	$-u_7$	$-u_5$	$-u_5$			
$^1/_9\ \sin 20^\circ = 0{,}03800$	u_2	$-u_2$	$-u_4$	u_4	$-u_8$	u_8			
$^1/_9\ \sin 30^\circ = 0{,}05556$	u_3	u_3	u_3	u_3	$-u_3$	$-u_3$	$u_1+u_5-u_7$	$u_1+u_5-u_7$	
$^1/_9\ \sin 40^\circ = 0{,}07142$	u_4	$-u_4$	u_8	$-u_8$	u_2	$-u_2$			
$^1/_9\ \sin 50^\circ = 0{,}08512$	u_5	u_5	u_1	u_1	u_7	u_7			
$^1/_9\ \sin 60^\circ = 0{,}09623$	u_6	$-u_6$	$-u_6$	u_6	u_6	$-u_6$	$u_2+u_4-u_8$	$-(u_2+$ $+u_4-u_8)$	
$^1/_9\ \sin 70^\circ = 0{,}10441$	u_7	u_7	$-u_5$	$-u_5$	u_1	u_1			
$^1/_9\ \sin 80^\circ = 0{,}10942$	u_8	$-u_8$	u_2	$-u_2$	$-u_4$	u_4			
$^1/_9\ \sin 90^\circ = 0{,}11111$	u_9	u_9	u_9	u_9	$-u_9$	$-u_9$	u_3-u_9	u_3-u_9	u_1-u_3+ $+u_5-u_7+$ $+u_9$
	A_1	A_{17}	A_5	A_{13}	A_7	A_{11}	A_3	A_{15}	A_9
При замене u через v	B_1	B_{17}	B_5	B_{13}	$-B_7$	$-B_{11}$	$-B_3$	$-B_{15}$	B_9

В том случае, когда можно ограничиться меньшей точностью и меньшим числам составляющих, применяют способ двенадцати ординат. Вводя те же обозначения, при расположении y-ков в 2 ряда,

$$y_1\ y_2\ y_3\ y_4\ y_5\ y_6$$

$$y_{12}\ y_{11}\ y_{10}\ y_9\ y_8\ y_7 \text{ , получим}$$

$$6A_k = u_1 \sin 15\,k + u_2 \sin 30\,k + \ldots + u_5 \sin 75\,k + u_6 \sin 90\,k\,;$$

$$6B_k = v_5 \cos 15\,k + v_4 \cos 30\,k + \ldots v \cdot \cos 75\,k + v_6\,.$$

После такого же, как и выше, перехода к углам меньшим 90°, коэффициенты u и v с их знаками могут быть сведены в следующую таблицу:

$^1/_6$ Sin 15° = 0,04314	u_1	u_1	u_5	u_5		
$^1/_6$ Sin 30° = 0,08333	u_2	$-u_2$	u_2	$-u_2$		
$^1/_6$ Sin 45° = 0.11785	u_3	u_3	$-u_3$	$-u_3$	$u_1+u_3-u_5$	$u_1+u_3-u_5$
$^1/_6$ Sin 60° = 0,14434	u_4	$-u_4$	$-u_4$	u_4		
$^1/_6$ Sin 75° = 0,16099	u_5	u_5	u_1	u_1		
$^1/_6$ Sin 90° = 0,16667	u_6	$-u_6$	u_6	$-u_6$	u_2-u_6	$-(u_2-u_6)$
	A_1	A_{11}	A_5	A_7	A_3	A_9
При замене u через v	B_1	$-B_{11}$	B_5	$-B_7$	$-B_3$	B_9

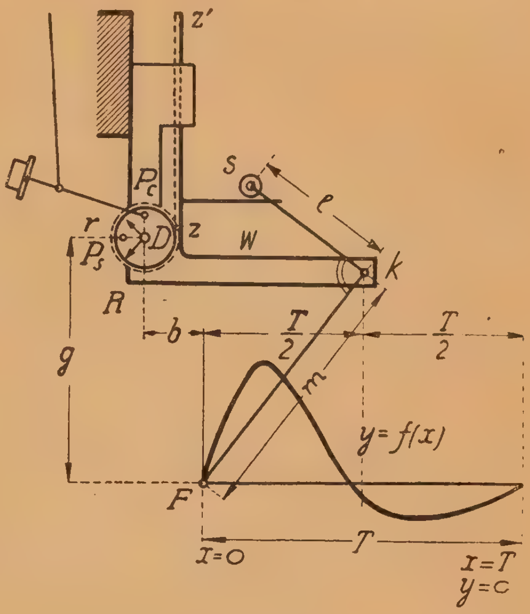
Б. И. Гамрат-Курек [3]) дал таблицы, весьма облегчающие вычисления для случая деления полупериода симметричной кривой на 180 частей. Такие вычисления, несмотря на таблицы, все же утомительны и отнимают много времени (по Б. Гамрат-Куреку для анализа кривой с 14-ю составляющими нечетного порядка, т.-е. кончая составляющей 27-го порядка, необходимо не менее 16 часов работы). Поэтому в последнее время во все большее употребление входят механические приборы для анализа кривых, так наз. анализаторы.

[1]) Проф. И. А. Черданцев—„Теория переменных токов". Госиздат, 1923 г. 32 страницы.
[2]) Zoppé. Ecl. El. (1899), 525; (1902), 287.
Runge. Z. f. Math. n. Phys. (1903), 443, ETZ. (1905), 247.
Кроме того, иные приемы упрощения вычислений изложены:
Hermann. ETZ. (1910), 55, 96.
Schleiermacher. ETZ. (1910), 1246.
Pichelmayer. ETZ. (1912), 129.
Meuer. ETZ. (1913), 121.
[3]) Б. И. Гамрат-Курек. „Известия Киевского Политехнического Института". 1910 г.

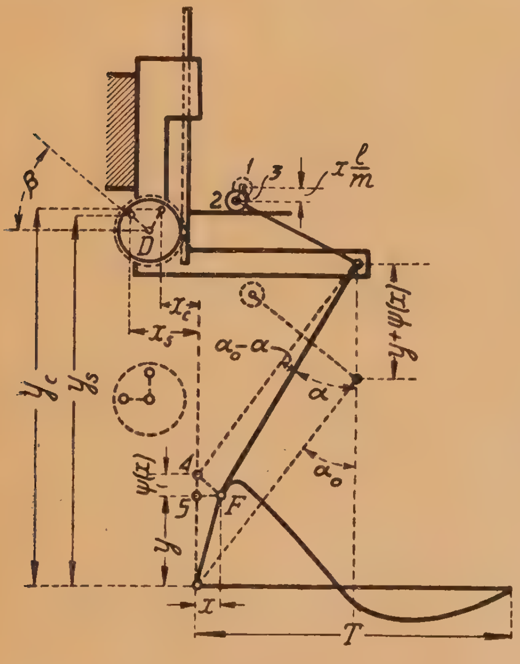
3. Анализаторы.

Чтобы сократить работу по анализированию кривых, были сконструированы особые приборы, называемые анализаторами; существует несколько систем их,—за теорией их и описанием конструкций мы отсылаем читателя к прекрасной книге E. Orlich'а „Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven (Vieweg und Sohn), здесь же мы опишем одну лишь систему,—анализатор Mader'а [1]), отсутствующий в книге Orlich'а, так как он появился позднее ее составления, но как раз весьма выгодно отличающийся от других систем как простотой принципа устройства и конструкции, так и простотой манипулирования и необходимых вычислений. Устройство анализатора Mader'а изображено схематично на фиг. 215. Здесь W есть подвижная часть прибора в виде некоторого угольника, могущая перемещаться только в вертикальном направлении (вдоль оси y-ков); относительно нее тоже только вертикально может перемещаться зубчатая рейка ZZ',

эта рейка связана с одной стороны с роликом S, который может кататься вдоль по горизонтальной полочке, прикрепленной к рейке, с другой стороны—посредством зубцов с зубчатым колесом D. Ролик S сидит на конце рычага SKF, плечи которого составляют прямой угол. Поведем конец F этого рычага несущий штифт, вдоль исследуемой кривой $y=f(x)$ от точки $x=0$, $y=0$ до точки $x=T$ (периоду) и $y=0$, а затем от этой последней точки уже по оси абсцисс назад к началу; при этом плечо FK заставит всю часть W совершить некоторое движение вверх и вниз, а ролик S принудит сделать тоже рейку ZZ', а через нее заставит колесо D повернуться. По возвращении штифта F в исходную точку все точки прибора займут начальное положение, при этом окажется, что любые точки P_c и P_s колеса D опишут некоторые замкнутые кривые. Выберем эти точки так, чтобы $P_s D \perp P_c D$ и $P_s D = P_c D = r$, тогда при подходящем подборе r и всех линейных размеров в приборе площади этих кривых, описанных точками P_s и P_c, будут пропорциональны амплитудам составляющих в разложении функции $y=f(x)$ в ряд Fourier. Произведем вычисление. На фиг. 216 аппарат представлен в положении, соответствующем некоторому положению штифта F на кривой.



Фиг. 215.



Фиг. 216.

Координаты разных важных точек аппарата обозначены как на фиг. 215, так и на фиг. 216. Перемещению штифта F в точку с координатами x, y соответствует угол β поворота зубчатого колеса D Из подобия треугольников $\overline{45F}$ и $\overline{123}$, как треугольников с взаимно перпендикулярными сторонами, следует, что $\overline{13} : \overline{5F} = \overline{12} : \overline{4F}$, а из треугольников $\overline{4FK}$ и $\overline{12K}$

$$\overline{12} : \overline{4F} = \overline{SK} : \overline{KF} = l : m.$$

Поэтому

$$\overline{13} = \overline{5F} \cdot \frac{l}{m} = x \cdot \frac{l}{m} ,$$

а угол поворота колеса D, если его радиус равен R, есть

$$\beta = \frac{xl}{Rm} .$$

Далее, если штифт переместился по направлению оси y-ков на y, то часть прибора W переместится на некоторую другую величину, зависящую от того, в каком месте кривой штифт идет, т.-е. зависящую от x; обозначим перемещение W через $y+\psi(x)$.

Составим выражения для координат точек P_c и P_s и определим описываемые этими точками площади. Когда штифт F находится в начале координат, то эти точки имеют координаты, как видно из фиг. 216, следующее:

$$x_s = -(b+r);\ y_s = g$$
$$x_c = -b;\ y_c = g+r .$$

При некотором другом положении штифта F на кривой, как видно из фиг. 216, координаты будут таковы:

$$x_s = -\left[b + r \cdot \cos\left(\frac{xl}{Rm}\right)\right];$$

$$y_s = g + y + \psi(x) + r \cdot \sin\left(\frac{xl}{Rm}\right);$$

$$x_c = -b + r \cdot \sin\left(\frac{xl}{Rm}\right);$$

$$y_c = g + y + \psi(x) + r \cdot \cos\left(\frac{xl}{Rm}\right).$$

Площадь, описанная точкою P_s выразится так:

$$Q_s = \int_0^T y_s\,dx_s = \int_0^T \left[g + y + \psi(x) + r\sin\left(\frac{xl}{Rm}\right)\right] d\left[-b - r\cos\left(\frac{xl}{Rm}\right)\right] +$$

$$+ \int_T^0 \left[g + O + \psi(x) + r\sin\left(\frac{xl}{Rm}\right)\right] d\left[-b - r\cos\left(\frac{xl}{Rm}\right)\right] ,-$$

первый интеграл соответствует движению штифта по кривой,—а второй по оси абсцисс.

Здесь по раскрытии квадратных скобок интегралы, за исключением одного, дадут попарно нули; поэтому мы получим, что

$$Q_s = \frac{rl}{Rm} \int_0^T y \sin\left(\frac{xl}{Rm}\right) dx \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(IV)}$$

Подобным же образом для площади, описываемой точкою P_c, получаем:

$$Q_c = \frac{rl}{Rm} \int_0^T y \cos\left(\frac{xl}{Rm}\right) dx \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(V)}$$

Штифт F может быть передвигаем по плечу FK, этим мы можем, по произволу, брать то или иное значение для величины $FK=m$, радиус R колеса D мы можем менять, заменяя одно колесо—с одним R и r—другим колесом—с другим R и r.

Подберем размеры так, чтобы

$$R = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{l}{m} \cdot \frac{1}{n},$$

где n будем придавать значения 1, 2, 3 и т. д. Далее положим

$$n\pi r = K.$$

Тогда из формул (IV) и (V), сравнивая их с формулами (III) этой главы, получим

$$Q_s = K\frac{2}{T}\int_o^T y \sin\left(n\frac{2\pi x}{T}\right) dx = KA_n,$$

$$Q_c = K\frac{2}{T}\int_o^T y \cos\left(n\frac{2\pi x}{T}\right) dx = KB_n,$$

Таким образом, задаваясь числом n, т.-е. порядком составляющей, амплитуду которой мы хотим определить, подбираем R и m, как указано выше, ставим в точку P_s штифт обыкновенного полярного планиметра и обводим штифтом F кривую и ось абсцисс. Отсчитав на планиметре величину площади, описанной точкой S, делим ее на K и получаем A_n; для вычисления B_n штифт планиметра ставим в точку P_s. Величина

$$A_o = \frac{1}{T}\int_o^T y\, dx$$

в ряде Fourier может быть найдена простым планиметрированием площади исследуемой кривой.

Простота устройства позволяет сделать этот анализатор, с одной стороны, весьма точным, с другой,—и самым дешевым из всех существующих систем.

Изготовляется он фирмою Gebr. Sterzel, München. Амплитуды с ним определяются с точностью до десятых долей mm при основании T от 20 до 360 mm.

---

[1]) Mader ETZ. 1909. 847.

Таблица некоторых постоянных.

M — место в периодической системе.
ϒ — удельный вес в g/cm^3 при 15° C.
a — международный атомный вес (O = 16).
ε — электрохимич. эквивалент в mg для 100 кулон $\left(1{,}03633 \text{ при } \frac{a}{w} = 1\right)$.
w — валентность.
τ — точка плавления в ° C.
δ — „ застывания в ° C.
α — температурный коэффициент в омах для 1000 ом при изменении температуры на 1 ° C.
ρ — удельное сопротивление в микоомсант. при 15° C.
* — обозначает среднюю величину.
† = 10^{-5}.

M	Вещество	Индекс	ϒ	a	ε	w	τ/δ	ρ	α
7	Азот (0°)	N	126 †	14,01	4 81	3	/−210,5	—	—
89	Актиний	Ac	—	227	—	—	—	—	—
13	Алюминий	Al	2,58	27,10	9,36	3	658	2,90	3.8
	„ литой	—	2,64	—	—	—	—	—	—
	„ прокат.	—	2,70	—	—	—	—	3,10	3,7
	Алюминиевая бронза (8 Al 92 Cu)	—	7,7	—	—	—	—	2,0	1,0
18	Аргон (0°)	A	178 †	39,88	41,33	1	−189,5/−185	—	—
56	Барий	Ba	3,75	137,37	71,17	2	850	—	—
4	Берилий	Be	2 *	9,10	4,71	2	> 1800	—	—
5	Бор	B	2,45	11,0	3,80	3	2350 *	—	—
35	Бром (0°)	Br	3,2	79,92	82,82	1	—7,3/60	—	—
	Бронза (90 Cu 10 Sn)		8,7	—	—	—	900	3	2
23	Ванадий	V	5,5	51,0	—	—	1730	—	—
83	Висмут	Bi	9,80	208,0	71,81	3	270/1400	120	3,7
1	Водород (0°)	H	8,96†	1,008	1,0446	1	/—259	—	—
74	Вольфрам	W	18,7	184,0	95,34	2	3000	6,0	4,5
64	Гадолиний	Gd	—	157,3	54,30	3	—	—	—
31	Галлий	Ga	5,95	69,9	24,14	3	30,1	—	—
2	Гелий (0°)	He	17,8†	3,99	4,13	1	/— 269	—	—
32	Германий	Ge	5,47	72,5	18,77	4	960?	—	—
67	Гольмий	Ho	—	163,5	56,47	3	—	—	—
	Графит натуральный	C	2,33	12,00	3,11	4	—	390÷900	−0,5
	„ ретортный	—	1,89	—	—	—	—	1500	−0,5
66	Диспрозий	Dy	—	162,5	56,14	3	—	—	—
63	Европий	Eu	- -	152,0	—	—	—	—	—
26	Железо	Fe	7,88	55,84	28,93	2	1520	12,1	4,5
	„ кузнечное	—	7,8	—	—	—	1500	12,5÷13	4,5
	„ литое	—	7,85	—	—	—	1500	13,0	4,0
79	Золото	Au	18,85	197,2	68,12	3	1063	2,20	3,65
	„ литое	—	19,25	—	—	—	—	—	—
	„ откованное	—	19,3	—	—	—	—	—	—
49	Индий	In	7,42	114,80	39,66	3	154,5/1000?	—	—
53	Иод	I	4,95	126,92	131,52	1	114/184,3	—	—
77	Иридий	Ir	22,4	193,10	100,0	2	2300	—	—
70	Иттербий	Yb	—	173,8	60,03	3	1800 *	—	—

M	Вещество	Индекс	γ	a	ε	w	τ/δ	ρ	α
39	Иттрий	Y	—	88,7	30,63	3	1200 *	—	—
48	Кадмий	Cd	8,69	112,40	58,24	2	321/860	7,0	4,0
19	Калий	K	0,86	39,10	40,52	1	62,3/720	6,0	—
20	Кальций	Ca	1,58	40,07	20,76	2	805	10,6	—
8	Кислород (0°)	O	143 †	16,00	8,29	2	/—230	—	—
27	Кобальт	Co	8,75	58,97	30,55	2	1480	9,25	—
	„ литой . . .	—	8,17	—	—	—	—	—	—
	„ откованный	—	9,15	—	—	—	—	—	—
	Константан 58 Cu 1 Mn 41 Ni	—	8,82	—	—	—	—	50	0,025
36	Криптон	Kr	—	82,92	85,93	1	/—169	—	—
	Круппин Ni Fe . . .	—	8,1	—	—	—	—	85	0,77
54	Ксенон	X	—	130,2	134,93	1	/—140	—	—
57	Лантан	La	6.1*	139,0	47,98	3	810 ?	—	—
	Латунь литая	—	8,55*	—	—	—	—	8,0	1.5
	„ прокатанная .	—	8,57*	—	—	—	—	7,5	1,5
3	Литий	Li	0,59	6,94	7,19	1	186/950	—	—
71	Лютеций	Lu	—	175,0	—	—	—	—	—
12	Магний	Mg	1,72*	24,32	12,60	2	650/1100	—	4,5
25	Марганец	Mn	7,32*	54,93	28,45	2	1900	—	—
	Маганин 84 Cu 12 Mn 4 Ni	—	8,3	—	—	—	—	43,0	0,015
29	Медь чистая . . .	Cu	8,92	63,57	32,93	2	1100	1,67	3,94
	„ кованная . . .	—	8,95	—	—	—	—	1,75	—
	„ литая	—	8,60	—	—	—	1083	1,76	4,0
42	Молибден	Mo	8,05	96,00	49,74	2	2500 ?	5,0	3,3
33	Мышьяк	As	5,75*	74,96	25,88	3	500	—	—
11	Натрий	Na	0,98	23,00	23,83	1	97,5/742	4,4	—
	Нейзильбер 26 Cu 37 Ni 37 Zn . . .	—	8.30	—	—	—	—	51,0 *	0,07*
	Нейзильбер 52 Cu 22 Ni 26 Zn. . . .	—	8,45	—	—	—	—	45,0 *	0,1 *
	Нейзильбер 59 Cu 11 Ni 30 Zn. . . .	—	8,34	—	—	—	—	35,0 *	1,15*
	Нейзильбер 63 Cu 6 Ni 31 Zn	—	8,30	—	—	—	—	30,0 *	0,3 *
60	Неодим	Nd	—	144,3	—	—	840 ?	—	—
10	Неон (0°)	Ne	90 †	20,2	20,93	1	/—253 ?	—	—
28	Никкель литой . . .	Ni	8,28	58,68	30,40	2	1450	—	—
	„ прокатанный	—	9,20	—	—	—	—	9,0	4,3
	Никкелин 54 Cu 26 Ni 20 Zn	—	8,62	—	—	—	—	42,0	0,22
41	Ниобий	Nb	7,20	93,5	19,38	5	2230	—	—
85	Нитон	Nt	—	222,4	—	—	—	—	—
50	Олово	Sn	7,3	118,7	61,51	2	232/1500	12,0	4,5
76	Осмий	Os	22,5	190,9	98,92	2	2700?	25	3,72
46	Палладий	Pd	11,3	106,7	55 47	2	1550	10,6	—
78	Платина литая . . .	Pt	21,49	195,20	101,15	2	1775	9,2	3,8
	Платиноридий . . .	—	—	—	—	—	—	36,0	0,64
	Платиносеребро . . .	—	—	—	—	—	—	25,0	0,3
84	Полоний	Po	—	210,0	—	—	—	—	—

M	Вещество	Индекс	γ	a	ε	w	τ/δ	ρ	α
59	Празеодим	Pr	—	140,6	—	—	940	—	—
88	Радий	Ra	—	226,40	—	—	900 ?	—	—
	Реотан Cu Ni Zn . .	—	8,6	—	—	—	—	47,0	0,23
45	Родий	Rh	12,1	102,9	53,31	2	1920 ?	—	—
80	Ртуть (0°)	Hg	13,596	200,60	207,89	1	—38,7/357,3	94,2(0°)	0,9
37	Рубидий	Rb	1,52	85,45	88,55	1	38,5	11,9	2,4
44	Рутений.	Ru	12,26	101,7	52,70	2	> 1950	—	—
62	Самарий	Sa	—	150,4	—	—	1350 *	—	—
82	Свинец литой	Pb	11,35	207,1	107,32	2	327/1500	26,8	4,0
	„ прокатанный	—	11,38	—	—	—	—	—	—
	„ тянутый . .	—	11,40	—	—	—	—	—	—
34	Селен.	Se	4,5	79,2	41,04	2	218/700	—	—
16	Сера	S	2,0	32,07	16,61	2	116/445	—	—
47	Серебро литое. . . .	Ag	10,45	107,88	111,80	1	961	1,61	3,8
	„ прокатанное	—	10,62	—	—	—	—	1,64	4,15
14	Силиций	Si	2,39	28,30	7,33	4	1420	59,5	4,0
21	Скандий	Sc	—	44,1	—	—	1200 *	—	—
	Сталь литая.	—	7,83	—	—	—	1375	14÷20	3,6
38	Стронций	Sr	2,54	87,63	45,40	2	830 *	—	—
81	Таллий	Tl	11,85	204,0	70,46	3	302/> 1100	—	—
51	Сурьма	Sb	6,62	120,20	41,52	3	430/1600	43,5	—
73	Тантал	Ta	16,5	181,50	37,62	5	2900	16,5	2,34
52	Теллур	Te	6,4*	127,50	66,07	2	451	5900	—
65	Тербий	Tb	—	159,2	—	3	—	—	—
22	Титан	Ti	4,5	48,1	12,45	4	2300 ?	125000	—
90	Торий	Th	11,0	232,40	60,21	4	1730 ?	—	—
69	Туллий.	Tu	—	168,50	58,21	3	—	—	—
6	Уголь аморфный . .	C	1,40	12,00	3,11	4	—	—	—
	„ для дуг. фонар.	—	1,6*	—	—	—	—	2500 *	—0,5*
	„ „ нитей накаливания	—	1,7*	—	—	—	—	2000 *	—0,4
92	Уран	U	18,7	238,50	123,63	2	2490 ?	—	—
15	Фосфор желтый . . .	P	1,83	31,04	10,71	3	44,1/290	—	—
	„ красный . .	—	2,18	—	—	—	/100	—	—
	„ металлическ.	—	2,20	—	—	—	—	—	—
9	Фтор	F	171 †	19,0	19,68	1	/—223	—	—
17	Хлор (0°)	Cl	317 †	35,46	36,75	1	—101,5/—33	—	—
24	Хром	Cr	6,5*	52,00	26,94	2	>1800	—	—
	Хромникель	—	8,03	—	—	—	1335	121	0,12
55	Цезий	Cs	1,85	132,81	137,63	1	26,5/270	19,1	—
58	Церий	Ce	6,68	140,25	48,45	3	645	—	—
30	Цинк	Zn	7,1	65,37	33,87	2	419,3/930	6,02	3,2
40	Циркон	Cr	6,4	90,6	23,47	4	>1420	—	—
	Чугун доменный . .	—	7,3*	—	—	—	1100*	30÷35	—
	„ литейный . .	—	7,30	—	—	—	1275	20÷30	3,5
86	Эманий.	Em	—	223,0	—	—	—	—	—
68	Эрбий.	Er	—	167,7	57,9	3	—	—	—

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А. Стр.

Абсолютное измерение VII
» » емкости . . 135
Аккумулятор, измерение изоляции . 57
» испытание 169
» коэфф. полезн. действ. 171
» саморазряд 172
» электрическая отдача 171
Амперметр Бенишке 13
» градуирование 160
» индукционный . . . 12
» испытание 162
» метод трех 99
» поправочная кривая . . 162
» с подвижной катушкой (Депре) 5
» с электромагнитным экраном 13
» тепловой 3
» Феррариса 12
» шунтирование 2
» электродинамический . . 7
» электромагнитный . . . 10
Анализатор гармонический 240
Анализаторы 240
Анализ кривых переменного тока . . 235
» » арифметический . . 237
» » графический . . . 237
» » экспериментальный 235
Апериодичность VIII
Архимедова спираль 226
Астазирование внешнее 17
» внутреннее 17

Б.

Баллистическая постоянная 125
Баллистич. гальв. 119, 128
» » уравн. 119
» метод 180
» электрометр 183
Бинантный электрометр 71
Бифилярный измерительный мостик 144
Блонделя осциллограф 224
Болометр 86
Брауна трубка 233

В. Стр.

Вариометр взаимоиндукции . . . 154
» самоиндукции 144
Вестона, нормальный элемент . . . 67
Весы магнитные 191
Взаимоиндукция, измерение . . . 149
» сравнение с взаимоиндукцией . . 153
» сравнение с емкостью 150
» сравнение с самоиндукцией . . . 152
» эталон 129
Вибрационный гальванометр . . . 69
» электрометр 69
Висмутовая спираль 195
Вольтаметр 80
Вольтметр Бенишке 13
» градуирование 161
» для высокого напряжен. 161
» индукционный 12
» испытание 163
» метод трех 98
» поправочная кривая . . 163
» реостатирование 3
» с подвижной катушкой (Депре) 5
» с электромагнитным экраном 13
» тепловой 3
» Феррариса 12
» электродинамический . . 7
» электромагнитный . . . 10
» электростатический . . . 14
Восприимчивость магнитная 179
Вращающееся поле 12
Времени постоянная 156
Вынужденные колебания 227
Высокая частота, измерение токов . 85
» » источники тока. . 131
Высокое напряжение, измерение мощности 77
Высокое напряжение, испытание изоляторов 159
Высокое напряжение, испытание изоляции 63

Г.

Стр.

Гальванометр, баллистический . . . 119
» вибрационный . . . 69
» градуирование . . . 20
» дифференциальный . 27
» зеркальный 15
» переменного тока . . 42
» сопротивление . . . 37
» с подвижной катушкой 18
» с подвижным магнитом 15
» установка 19
Гаусса индуктор 181
Герке осциллограф 234
Гистерезис, измеритель 201
» сопротивлений 160
» петля динамическая . 213
» » статическая . . 176
Градуирование амперметра 160
» баллистического гальванометра 125
» вольтметра 161
» ошибка VIII
Громоотвод, исследование 43

Д.

Двойное включение электрометра . . 74
Двойной коммутатор 134
» мостик Томсона 34
Декремент логарифмический . . . 125
Делитель напряжения 161
Демпфирование VIII
Демпфирование, кривая IX
» постоянная кабеля 134
Демпфирующий фактор 125
Дифференциальная кривая . . . .
Дифференциальное измерение емкости 136
Дифференциальное измерение мощности 210
Дифференциальное измерение самоиндукции 139
Дифференциальное измерение сопротивления 27
Дифференц. гальв. 27
» » баллистический . 137
Дифференциальный магнитометр . . 196
» метод 27
» телефон . . . 145
» трансформатор 145
Диэлектрич. пост. 158
» » воздуха 158
Добавочное сопротивление 3
Дудделя осциллограф 226

Е.

Емкость, абсолютное измерение . . 135
» аккумуляторов 171
» подводного кабеля . . . 59
» проводов 63
» сравнение 130
» » с взаимоиндукцией 150
» » с самоиндукцией 146

Ж.

Железо:

испытание баллистическим методом 180
» в готовых изделиях . . 210
» висмутовой спиралью . . 195
» в листах 210
» в пачках 211
» магнитными весами . . 191
» магнитометром 175
» нулевым методом . . . 196
» отрыванием 190
» переменным током . . . 211
» прибором Кепселя . . . 194
» прибором Эпштейна . . . 202
Железо, разделение потерь 206
» удельные потери 205
Жубера диск (шайба) 220

З.

Заземление, вспомогательное . . . 44
» сопротивление 43
Замещения, метод 23
Земельное замыкание, испытатель . 63
Зуммерумформер 131

И.

Измерение, абсолютное VII
» относительное VII
» ошибки VII
» точность VII
Измерительный трансформатор . . . 81
Изолирующие материалы, испытание 48
» пробивная крепость . 159
Изоляторы для высокого напряжен.
» испытание 159
» переходное сопротивление 48
» поверхностное сопротивление 48
» удельное сопротивление 48
Изоляция аккумуляторов, измерение 57
» в установках 67
» при высоком напряжении 45
» сопротивления 58
» телефонных кабелей . . 56
» трамваев . . . .
» установок переменного тока 62
» измеритель для переменного тока 62
» испытание 159
» место повреждения . . . 60
Индуктор Гаусса 181
Индукционная катушка 128

Стр.

Индукционный амперметр 12
» вольтметр 12
» счетчик 107
» уаттметр 90
» фазометр . . . 116
» частомер. 117
Интегрирование, графическое . . .
Искусственное состаривание магнита 6
Измерительный трансформатор напряжения 81
Измерительный трансформатор тока 82

К.

Кабель, емкость 134
» изоляция 46
» сопротивление 134
» фазовый угол 134
Капиллярный электрометр 78
Качание, длительность 126
Квадрантный электрометр 70
Кепселя аппарат 194
Кипятильник, испытание 173
» коэфф. полезн. действ. 174
Кларка, нормальный элемент . . . 72
Ключ Гейма 133
» Зелени 130
Количество электричества, измерение 119
Коллектор, кривая 218
» потенциальная кривая . 218
Компенсатор, комплексный 68
Компенсационный аппарат 64
» » для переменного тока 68
Компенсационный метод 62
Конденсатор 129
» угол потерь 134
Контрольный счетчик 163
Коэффициент мощности 100
Курвограф. 195

Л.

Липпмана электрометр 78
Листовое железо, испытание в листах
» » » в пачках
Логарифмическая бумага 175

М.

Магнитная восприимчивость 179
Магнитная проницаемость, определение 210
Магнитное напряжение, измеритель Роговского 185
Магнитные весы Дю Буа 191
» » Коттона 194
» » Юинга 194
Магнитный перешеек, метод 186
Магнитобоязнь 11
Магнитометрический метод 175
Магнитомоторный счетчик 105
Манса, метод 38

Стр.

Маятниковый счетчик 112
Многокамерный электрометр . . . 14
Мостик для переменного тока . . . 134
» рассчет 23
» Уитстона 20
Мощность, измерение 68, 76, 78, 87
» » многофазного тока . . . 91
» » нулевым методом . . . 78
Мультипликационный метод . . . 181

Н.

Намагничивание, вращающееся . .
» кривая, динамическая . . . .
» кривая, статическая 176, 180
Нормальный элемент Вестона . . . 67
» » испытание . 67
» » Кларка . . . 72

О.

Ондограф 223
Осциллограф Герке 234
» по Блонделю 224
» с подвижной системой, не обладающ. инерцией 232
» обладающей инерцией . 231
Отдача электрическая аккумулятора 171
Отклонение—способ прямого отклонения 45
Относительное измерение VII
Ошибка градуирования VIII
» измерения VIII
» наблюдения VII
» прибора VIII

П.

Падение напряжения, метод 61
Паульсена лампа 58
Переключатель вращающийся . . 135
Переменного тока:
высокое напряжение, измерение 81
гальванометр 42
кривые, анализ 235
» снятие 220
малой силы, измерение . . . 42
мостик 134
напряжение, измерение 68
приборы, испытание 163
установки, испытание изоляции 62
Переходное сопротивление изоляторов 48
Пермеаметр 185, 189, 190
Петли метод 60
Питательный пункт, измерение напряжения 82
Поверхностное сопротивление изоляторов 48
Повреждение изоляции, место . . . 60

Стр.

Подводный кабель, емкость 59
Потенциальная кривая коллектора . 218
Полюсная диаграмма 213
Полюс свободный 177
Поправочная кривая амперметра . . 163
» » вольтметра . . 163
» » счетчика . . . 166
» » уаттметра . . 166
Постоянная баллистическая 125
» времени 156
Потенциометр 69
Потери в железе, разделение их . . 206
» » » удельные 203
» угол для сопротивления . . . 156
Прибор для испытания железа Каппа 189
Прибор для испытания железа Кепселя 194
Прибор для испытания железа Эпштейна 202
Приборы измерительные, индукционные по Бенишке 13
Приборы измерительные, индукционные по Ферраресу 12
Приборы измерительные:
с блуждающим магнитным полем 108
с вращающимся магнитным полем 12
с электромагнитными экранами 13
тепловые 3
ферродинамические 9
электромагнитные 10
электростатические 14
Пробивная крепость изолирующих материалов 159
Пробивное напряжение, удельное . . 159
Проницаемость магнитная определение 210
Прямое отклонение, метод 45

Р.

Разделение потерь в железе . . . 206
Рассеяния индукция трансформатора 144
» коэффициент, определение 198
Резонанс для сравнения самоиндукций 145
Реограф 231
Реостатирующий множитель 3

С.

Самоиндукция 137
» вариометр 144
» сравнение с взаимоиндукцией 152
» сравнение с емкостью 146
» сравнение с самоиндукцией 142
» сравнение с эталоном 144
Саморазряд аккумулятора 172
Секометр 134

Стр.

Серебряный вольтаметр 80
Скольжение индукционного счетчика 108
Снятие кривых переменного тока . . 220
» » компенсационным способом 221
Сопротивление безиндукционное . . 76
» гальванометра . . . 37
» гистерезис 160
» измерение 20
» » малых 33
» » по закону Ома 24
» лампы накаливания. 25
» стыков рельс . . . 45
» удельное 40
» элемента 38
Срезывания кривая 188
» линия 178
Стефанса поправка для уаттметра . 88
Струнный прерыватель 131
Стыки рельс, сопротивление . . . 45
Счетная линейка, электрическая . . 23
Счетчик 100
» ампер-часов 105, 111
» вольтчасов 105
» индукционный 107
» испытание 163
» контрольный 163
» магнитомоторный 105
» маятниковый 112
» с блуждающим полем . . . 107
» уаттчасов 100
» электродинамический . . . 101
» электрохимический . . . 114

Т.

Телефон дифференциальный . . . 145
» оптический 69
Температурный коэффициент . . . 63
Тепловой амперметр 3
» вольтметр 3
Термобатарея, испытание 172
» коэфф. полезн. действия 173
Томсона двойной мост 34
Торроид 182
Торсионный пермеаметр 189
Точность измерения VII
Трамваи, измерение изоляции . . . 56
Трансформатор измерительный . . . 81
» напряжения 81
» тока 82
Трубка Брауна 233
» Гейслера 63
» катодная 159

У.

Уаттметр для высокого напряжения 100
» индукционный 90
» испытание 163
» электродинамический . . 90
» электростатический . . . 91

Стр.

Удельное сопротивление 41
Уитстона мостик 20
Универсальный гальванометр . . . 22
Униполярный метод 179

Ф.

Фазовый регулятор 164
» угол больших сопротивлений 156
» угол малых сопротивлений 37
Фазометр индукционный 116
» электродинамический . . 115
Феномен Халля 195
Феррариса приборы, см. индукционные 12
Ферродинамические приборы . . . 9
Флуксметр 185
Формфактор 209

Х.

Халля феномен 195

Ц.

Цилиндрический искровой промежуток 160

Ч.

Частотомер индукционный 117
» Мартинсена 118

Стр.

» резонансный 116
» электромагнитный 117

Ш.

Шайба Жубера 220
Шапейрона обмотка 156
Шунт 2
Шунтирующий множитель 2
Шунтовая декада 67
Штейнметца формула 216

Э.

Эквивалент электрохимический . . 80
Электродвижущие силы, сравнение 64
Электродинамический амперметр . . 8
» вольтметр . . 8
» счетчик . . . 101
» уаттметр . . . 90
Электромагнитный амперметр . . . 11
» вольтметр . . . 10
Электрометр, баллистический . . . 183
» дифференциальный . 138
» измерение им . . . 70
» капиллярный 78
Электростатистический вольтметр 14
» уаттметр . 91
Электрохимический счетчик 114
Элемент, сопротивление 38

Я.

Ярмо 187

УКАЗАТЕЛЬ ИМЕН.

	Стр.
Abraham	149, 231
Alberti	68
Alexanderson	213
Anderson	147
Angermann	210
Angström	179
Armagnat	236
Arno	86
Aron	93, 94, 166
Ayrton	98, 134
Baily	189
Barbagelata	69
Beattie	210
Behn-Eschenburg	92
Behne	134
Béla Gati	59, 86
Benischke	13
Bethenod	240
Blondel	69, 202 224
Böhm-Raffay	22
Boltzmann	159
Bosanquet	190
Bosscha	200
Bragstad	213
Braun	179, 233
Brion	15
Brückmann	114
Bruger	55
Buisson	233
Bukert	237
Bunge	222
Burrows	189
Butmann	137
Callendar	222
Campbell	69, 76, 129. 152, 153
Carey-Forster	155
Carpentier	223
Chapin	138
Clark	72
Clarkson	161
Coales	63
Cohen	131
Cotton	194, 195
Crawford	144
Creighton	159
Curie	71
Curtis	48, 69, 156
Déguisne	37, 68
Delon	160

	Стр.
Deprez	5
Diesseihorst	37, 67, 127, 136
Dietze	63
Dina	63
Donath	235
Dolezalek	58, 72, 131, 144
Drewell	76
Drexler	223
Drysdale	69, 156, 185
Duane	135
Du-Bois	136, 191
Du-Bois-Reymond	64
Duddel	52, 69, 100
Ebert	234
Ehrens	62
Eichberg	223
Eickemeyer	196
Elsasz	35
Emanueli	69
Enthoven	231
Epstein	202
Evans	237
Evershed	160, 184
Ewing	175, 186, 188, 194, 196, 201
Ferraris	87
Fessenden	86
Feuszner	64
Fischer-Hinnen	47
Fleming	99
Forsythe	147
Franke	43, 58, 67, 84, 222
Franklin	42
Freudenberger	42
Frisch	52
Fröhlich	52, 54, 55, 69
Гампат-Курек	240
Gans	231
Gauss	181
Gehrke	234
Gewecke	82, 165
Gibbon	145
Giebe	131, 134, 144, 156 158
Giersing	60
Gill	191
Giltay	43
Goldschmidt	196, 200
Goltze	185, 210
Görges	93
Greinacher	69

Стр.

Grover 134, 139, 149, 156
Grühn 195
Grüneisen 158
Guillet 181
Gumlich 185, 188, 190, 210
Haidegger 95
Hallwachs 70
Hartmann-Kempf 58
Haupt 179
Hausrath 33, 67, 144, 146, 232
Hay 134
Heinke 131
Heinrich 53
Helmholtz 131
Hendricks 159
Hermann 211, 237
Ho 145
Hockin 33
Hohage 144
Holborn 179
Holden 196
Holm 184
Hopkinson 187
Hospitalier 223
Hotchkiss 225
Howard 195
Howe 134
Hund 211
Illiovici 148
Jäger 32, 37, 68, 135
Joubert 138, 220
Kahle 67
Kallmann 52, 57
Kapp 56, 142, 189, 191
Kaufmann 198, 213
Kennely 86
Kirchhoff 21, 30
Kirstädter 185
Kittler
Kock 160
Kohlrausch 32, 42, 43, 179
König 43, 137
Königsberger 183
Königswerther 114
Köpsel 194
Kries 58
Krüger 67
Krukowski 165
Kuderna 95
Kübler 223
Kurlbaum 135
Lamb 190
Larsen 68, 86, 144
Leduc 195
Leonard 195
Lichtenstein 76, 160
Liebenow 57
Lindeck 37
Linker 159
Liska 213
Longhuyzen 210
Lory 145
Lulofs 100
Lutowslavski 223
Lyle 213
Mader 240
Mance 38, 55

Стр.

Marcher 223
Martienssen 118
Mather 100
Matthissen 33
Maxwell 70, 135, 140, 142, 146, 152, 153, 190
Meurer 237
Michalke 222
Millis 225
Möllinger 180, 210
Montpellier 45
Mörk 57
Morphy 214
Moscicki 159
Müllendorf 52
Murdoch 179, 194
Murray 60
Naatz 213
Nernst 39
Niebuhr 146
Niethammer 223
Nippoldt 43
Oates 148
Orlich 71, 76, 78, 89. 94, 131, 145, 156, 169
Oschwald 214
Owens 223
Paterson 76
Perry 134
Petersen 160
Peukert 78, 84, 85, 196, 223
Pichelmayer 237
Picou 189
Pillier 57
Pirani 150
Pohl 201
Porter 57
Potier 227
Preus 22
Pupin 236
Quincke 159
Radtke 96
Raps 67
Rasch 83
Rayleigh 43, 178
Rayner 76, 78
Richter 210
Righi 195
Rogowski 185, 210
Roiti 150
Rosa 68, 131, 134, 139, 149, 222
Rose 210
Rotth 200
Rowland 180
Rubens 69
Rücker 185
Runge 237
Rusch 222
Ryan 222
Sahulka 56
Salomonson 85
Sauty, de 132, 133, 134
Sauvage 96
Schenkel 160
Schering 37, 68, 69, 134, 157, 160
Schleicher 185
Schleiermacher 237
Schmidt 69, 131, 134, 157, 185, 188
Schmiedel 92

	Стр.
Schmoller	189
Schultze	70, 71, 73, 76
Searle	129
Seefehlner	233
Sharp	144, 159
Simons	62, 166
Skutsch	52
Stafford	
Steinmetz	205
Stern	94
Stobrawa	57
Stösel	
Stroud	148
Sumpner	98, 144
Swineburne	98
Taylor	149
Thieme	86
Thiermann	67
Thompsen	190
Thomson, E.	
Thomson, J. J.	135
Thomson W.	37, 70, 85, 132
Townsend	213
Trowbridge	145, 150
Underhill	23
Черданцев	237
Чернышев	85
Varley	61

	Стр.
Vignoles	184
Vinal	68
Voege	198
Vogel	43
Wagner K. W.	59, 156
Walker	190
Weber	180
Wehnelt	232, 234
Weîcker	159
Weinhold	235
Weiszhaar	175
Wertheimer	156
Wheatstone	20
White	67
Wiechert	44
Wien M.	58, 62, 131, 134, 144
Williams	149
Wilsmore	67
Wirz	82
Wolff	67
Worthing	127
Wright	23
Wurm	44
Wurmbach	62
Ytterberg	183
Zeleny	130, 132
Zenneck	235
Zoppé	240

СОКРАЩЕНИЯ.

AEG = Allgemeine Elektrizitäts-Gesellchaft.
AFE = Arciv für Elektrotechnik.
ASEA = Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget.
Am. Journ. Sc. = Amerikan. Journal of Science.
Ann. d. El. = Annalen der Elektrotechnik.
Ann. d. Ph. = Annalen der Physik.
BBC = Brown., Boveri & Co.
Bl. f. Post. u. Tel. = Blätter für Post und Telegraphie.
Bull. Bur. Stand. = Bulletin of the Bureau of Standards.
Bull. SEV = Bulletin des Schweizer Eiektrotechnischen Vereins.
Buil. Soc. int. El. = Bulletin de la Société internationale des Electriciens.
CfE = Cenrtalblatt für Elektotechnik, München.
Compt. rend. = Comptes rendues.
Der Mechaniker = Приложение к Zeitschrift für Instrumentenkunde.
Dingl. Polyt. Journ. = Dinglers Polytechnisches Journal.
Ecl. El. = L'Eclairage électrique.
El. = The Electrician, London.
El. Anz. = Elektrotechnischer Anzeiger.
El. Eng. = The Eléctrical Engineer.
El. Kr. u. Bahnen = Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen.
El. Revue, London = Electrical Revue, London.
El. u. M. Wien. = Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien.
El. u. masch. Betr. = Elektrische und maschinelle Betriebe.
El. World = The Elektcrical World and Engineer.
Electr. = L'Elektricien.
Eng. = Engineering.
ETZ = Elektrotechnische Zeitschrift (Berlin).
FGL = Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke.
Fortschr. d. El. = Fortschrifte der Elektrotechnik (Strecker).
Gen. El. Rev. = General Electric. Review.
Illum. Eng. London = The Illuminating Engineer, London.
Ind. él. = L'Industrie électrique.
Journ. de phys. = Journal de physique.
Journ. f. Gas. = Journal für Gasbeleuchtung.
Jonrn. Inst. El. Eng. = Journal of the Institution of Electrical Engineer .
Journ. Soc. Arts. = Journal of the Society of Arts.
Journ. telegr. = Journal télégraphique.
Lum. El. = La Lumiere électrique.
Nat. phys. Lab. coll. res. = Natural physical Laboratory college researches.
Phil. Mag. = Phisophical Magazine.
Phil. Trans. = Phisophical Transactions.
Phil. Tr. Roy. Soc. = Philosophical Transactions of the Royal Society.
Phys. Rev. = Physical Revue.
Phys. Z. = Physikalische Zeitschrift.
Pogg. Ann. = Poggendorfs Annalen.
Proc. AIEE = Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers.
Proc. Phys. Soc. London. = Proceedings of the Physical Society, London.
Proc. Roy. Soc. = Proceedings of the Royal Society.

PTR = Physikalisch-Technische Reichsanstalt.
Rep. Tokyo Phys. Math. Soc. = Reports of the Tokyo Physical and Mathematical Society.
Rev. el. = Revue electrique.
Rev. prat. de l'Electr. = Revue pratique de l'Electricité.
Samml. el. Vortr. = Sammlung electrotechn. Vorträge, Enke, Stutlgart.
Schw. ETZ = Schweizer Elektrotechnische Zeitschrift.
Scient. Papers Bur. Stand. = Scientific Papers of the Bureau of Standards.
SSW = Siemens-Schuckertwerke.
Techn. Mon. = Technysche Monatshefte.
Tr. AIEE = Transactions of the American Inst. of Electrikal Engineers.
Traction El. = La Traction électrique.
VdE = Verbang deutscher Elektrotechniker.
VdGW = Verband deutscher Gas—und Wasserfachmänner.
Verh. d. d. phys. Ges. = Verhandlungen der deutschen physikalischen Gesellchaft.
Verh. d. naturf. Ges. = Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft.
Wied. Ann. = Wiedemanns Annalen.
Wien. Ber. = Wiener Berichte.
ZfBel. = Zeitschrilt für Beleuchtungstechnik.
ZfE = Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien (до 1905 г.).
ZfI = Zeitschrift für Instrumentenkunde.
Zf Math. u. Phys. = Zeitschrift für Mathematik und Pyhsik.
ZVI = Zeitschrif des Vereines deutscher Ingenieure.

В библиографических указаниях цифры в скобках обозначают номер журнала, том и год; цифры без скобок—страницы.

Stanford University Libraries
3 6105 023 407 146